

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

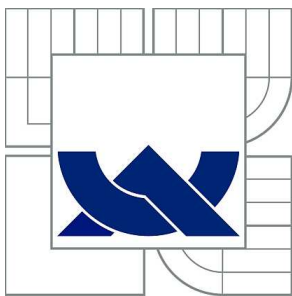
DISPERZNÍ VLIVY NA VYSOKORYCHLOSTNÍ PŘENOS OPTICKOU
SÍTÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

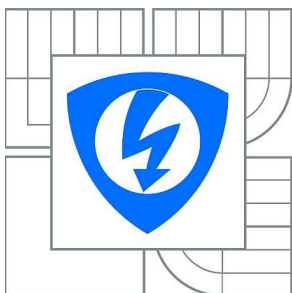
TOMÁŠ FILIP

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DISPERZNÍ VLIVY NA VYSOKORYCHLOSTNÍ PŘENOS OPTICKOU SÍTÍ

DISPERSION EFFECTS IN HIGH-SPEED OPTICAL NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

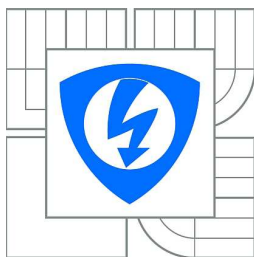
TOMÁŠ FILIP

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VLADIMÍR TEJKAL

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Tomáš Filip

ID: 111037

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Disperzní vlivy na vysokorychlostní přenos optickou sítí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem projektu je zhodnocení všech nežádoucích vlivů působících na přenos signálu v optických sítích. V projektu popište způsoby přenosu optického signálu v optickém vlákně. Prostudujte vlastnosti lineárních a nelineárních jevů působících na optický signál. Zaměřte se na disperzní vlivy, zejména PMD - polarizační vidovou disperzi. Porovnejte různé možnosti měření disperzí a zvažte jejich výhody a nevýhody.

Vyberte vhodnou metodu pro potlačení nežádoucích vlivů u jednovíkových optických vláken. Proveďte simulace vybraných kompenzačních metod a porovnejte jejich výsledky. Teoretické výsledky ověřte také praktickým měřením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, M. Optické sítě. Skripta. VUT FEKT, Brno 2003

[2] GALTAROSSA, A. Polarization Mode Dispersion. Springer, 2005. ISBN-10: 0-387-23193-5

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 2.6.2010

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Tejkal

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ANOTACE

Práce se zabývá principem optického přenosu, jeho přenosovými médii a dále pak výhodami a nevýhodami. V první polovině se zaměří na nežádoucí vlivy působící na přenos signálu v optických sítích, na disperzní vlivy a zejména pak na polarizační vidovou disperzi (PMD – Polarization Mode Dispersion). Druhá polovina práce se zabývá měřením vlastností optických vláken, převážně chromatické a polarizační vidové disperze, používanými metodami a jejich principy. Následně jsou uvedeny současné možnosti kompenzace disperzí. Sedmá kapitola se zabývá simulací optické trasy pomocí programu OptiSystem a testování vybraných kompenzačních metod při přenosové rychlosti 40Gb/s. V poslední kapitole jsou zpracovány výsledky měření reálné optické trasy pro Masarykovu univerzitu.

Klíčová slova: Optické vlákno, absorpce, rozptyl, chromatická disperze, polarizační vidová disperze, měření, kompenzace, disperzi kompenzující vlákno, čerpovaná Braggova mřížka

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focusing on optical transmission principal, its transfer mediums and furthermore also with focusing on its advantages and disadvantages. First half of this thesis focuses on adverse influences, which affect signal transmission in optical networks, on dispersion influences, especially on Polarization Mode Dispersion (PMD). Second half of this thesis deals with measuring of properties of optical fibers, largely chromatic and polarization mode dispersion, used methods and its principals. Furthermore, there are mentioned current compensation possibilities. The seventh chapter deals with optical route simulation in OptiSystem and testing chosen compensation methods for bit rate 40Gb/s. In the last chapter there are elaborated results of real optical route measurements for Masaryk University.

Key words: Optical Fiber, Absorption, Scattering, Chromatic Dispersion, Polarization Mode Dispersion, Measurement, Compensation, Dispersion Compensating Fiber, Fiber Bragg Grating

FILIP, T. *Disperzní vlivy na vysokorychlostní přenos optickou sítí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 75 s.
Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Tejkal.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „*Disperzní vlivy na vysokorychlostní přenos optickou sítí*“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladimíru Tejkalovi za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne

.....

Podpis autora

OBSAH

PROHLÁŠENÍ	7
PODĚKOVÁNÍ.....	8
SEZNAM OBRÁZKŮ	12
SEZNAM TABULEK.....	13
ÚVOD	14
1 PRINCIP OPTICKÉHO PŘENOSU A TYPY OPTICKÝCH VLÁKEN	15
1.1 PRINCIP OPTICKÉHO PŘENOSU	15
1.2 DRUHY OPTICKÝCH VLÁKEN	17
1.2.1 Mnohovidová optická vlákna	18
1.2.2 Jednovidová optická vlákna	18
1.2.3 POF – plastic optic fiber.....	19
1.3 TYPY OPTICKÝCH VLÁKEN	19
2 KABELY A OPTICKÉ SPOJE	26
2.1 OPTICKÉ KABELY	26
2.2 OPTICKÉ SPOJE	26
2.2.1 Nerozebíratelné spoje	26
2.2.2 Rozebíratelné spoje	27
2.2.3 Svařování optických vláken	27
3 VÝHODY, NEVÝHODY A OMEZENÍ OPTICKÝCH PŘENOSŮ	28
3.1 ZTRÁTY ABSORPCÍ	28
3.2 MATERIÁLOVÝ ROZPTYL	29
3.2.1 Lineární jevy	29
3.2.2 Nelineární jevy.....	29
4 DRUHY DISPERZÍ V OPTICKÝCH VLÁKNECH A JEJICH VLIV NA	
VYSOKORYCHLOSTNÍ PŘENOS OPTICKOU SÍTÍ.....	32
4.1 DEFINICE DISPERZE	32
4.2 SLOŽKY DISPERZE	32
4.2.1 Vidová disperze (Mode Dispersion, $D_{MOD}(\lambda)$)	32

4.2.2 Celková chromatická disperze (<i>Chromatic Dispersion, $D_{CH}(\lambda)$</i>)	33
a) Materiálová disperze (<i>Material Dispersion, $D_{MAT}(\lambda)$</i>)	35
b) Vlnododová disperze (<i>Waveguide Dispersion, $D_{WG}(\lambda)$</i>)	36
c) Profilová disperze (<i>Profile Dispersion, $D_P(\lambda)$</i>)	36
4.2.3 Polarizační vidová disperze (<i>Polarization Mode Dispersion, $D_{PMD}(\lambda)$</i>)	36
5 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ OPTICKÝCH VLÁKEN	39
5.1 METODY MĚŘENÍ DISPERZÍ	39
5.1.1 Měření chromatické disperze	39
a) Metoda fázového posuvu a diferenciálního fázového posuvu	39
b) Metoda zpožděných impulzů v časové oblasti	40
c) Interferometrická metoda	40
5.1.2 Měření polarizační vidové disperze	40
a) Tradiční interferometrická metoda (TINTY)	40
b) Obecná interferometrická metoda (GINTY)	41
c) Metoda skenování vlnové délky (metoda s fixním analyzátozem)	42
d) Metoda polarimetrická	42
e) Metoda POTDR	42
5.2 MĚŘENÍ ÚTLUMU	43
5.3 MĚŘENÍ ODRAZŮ (ODRAZIVOSTI)	44
5.4 MĚŘENÍ ÚTLUMU ODRAZU	44
6 SNIŽOVÁNÍ VLIVU DISPERZÍ NA PŘENOS	45
6.1 KOMPENZACE CHROMATICKÉ DISPERZE	45
6.1.1 Disperzi kompenzující vlákno (<i>DCF - dispersion compensating fiber</i>)	45
6.1.2 Čerpovaná Braggova mřížka (<i>FBG - fiber Bragg grating</i>)	46
6.1.3 Optická fázová konjugace (<i>OPC - optical phase conjugator</i>)	46
6.1.4 Záporné disperzní vlákno (<i>NDF - negative dispersion fiber</i>)	47
6.1.5 Reverzní disperzní vlákno (<i>RDF - reverse dispersion fiber</i>)	47
6.2 KOMPENZACE POLARIZAČNÍ VIDOVÉ DISPERZE	47
6.2.1 Kompenzátory PMD	48
a) adaptivní elektrickou kompenzací PMD	48
b) adaptivní optickou kompenzací PMD	48

a) kompenzátor před vláknem.....	49
b) kompenzátor za vláknem.....	49
6.2.2 Použití jiné vlnové délky	49
6.2.3 Použití jiného vlákna optického kabelu	49
6.2.4 Výměna celé optické trasy.....	49
6.2.5 Výměna úseku vlákna.....	50
7 SIMULACE OPTICKÉ TRASY A JEJÍ KOMPENZACE.....	51
7.1 VOLBA OPTICKÉ TRASY A PŘENOSOVÉ RYCHLOSTI	51
7.1.1 Vliv disperze na přenášený signál rychlostí 2,5Gb/s	53
7.1.2 Vliv disperze na přenášený signál rychlostí 10Gb/s	53
7.1.3 Vliv disperze na přenášený signál rychlostí 40Gb/s	54
7.2 KOMPENZACE CHROMATICKÉ DISPERZE OPTICKÉ TRASY	55
7.2.1 Kompenzace pomocí metody DCF.....	55
7.2.2 Kompenzace pomocí metody FBG.....	57
8 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ.....	59
8.1 MĚŘENÍ CD A PMD REFLEKTOMETRICKOU METODOU	59
8.1.1 Měření CD.....	59
8.1.2 Měření PDM	60
8.2 MĚŘENÍ CD METODOU FÁZOVÉHO POSUVU	60
ZÁVĚR.....	62
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	65
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	69
PŘÍLOHY	71

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Princip přenosu optickým vláknem [1]	16
Obr. 1.2: Stavba optického vlákna [6]	16
Obr. 1.3: Průběhy indexů lomu vláken s posunutou disperzí	17
Obr. 1.4: Průběhy indexů lomu vláken s rovnou disperzní charakteristikou	17
Obr. 1.5: Závislost koeficientu chromatické disperze na vlnové délce pro vlákno G.652 dle [16]	20
Obr. 1.6: Závislost koeficientu chromatické disperze na vlnové délce pro vlákno G.653 (v porovnání s G.652) dle [16]	22
Obr. 1.7: Závislost koeficientu chromatické disperze na vlnové délce pro vlákno G.654 dle [16]	22
Obr. 1.8: Závislost koeficientu chromatické disperze na vlnové délce (vlákno G.655 v porovnání s G.653) [23]	23
Obr. 1.9: Maximální dovolené ohyby pro vlákno G.657 dle [20]	25
Obr. 4.1: Šíření impulzů vláknem (Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu, mnohovidové vlákno gradientní, jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu) [2]	33
Obr. 4.2: Časové roztažení signálu v důsledku CD [16]	34
Obr. 4.3: Překrývání spektrálních složek v důsledku CD [16]	34
Obr. 4.4: Princip PMD [2]	37
Obr. 5.1: Metoda fázového posuvu [2]	39
Obr. 5.2: Metoda zpožděných impulzů [2]	40
Obr. 5.3: Tradiční interferometrická metoda (TINTY) [25]	41
Obr. 5.4: Obecná interferometrická metoda (GINTY) [25]	41
Obr. 5.5: Metoda skenování vlnové délky [2]	42
Obr. 6.1: Princip funkce čerpované Braggovy mřížky [2]	46
Obr. 7.1: Zapojení simulované optické trasy	51
Obr. 7.2: Vstupní (a) a výstupní (b) časový průběh jednoho bitu pro rychlost 2.5Gb/s	53
Obr. 7.3: Vstupní (a) a výstupní (b) časový průběh jednoho bitu pro rychlost 10Gb/s	54
Obr. 7.4: Vstupní (a) a výstupní (b) časový průběh jednoho bitu pro rychlost 40Gb/s	54
Obr. 7.5: Zapojení kompenzačního vlákna do trasy (a); vstupní (b) a kompenzovaný (c) časový průběh bitové sekvence	56
Obr. 7.6: Zapojení FBG mřížky do trasy (a); vstupní (b) a kompenzovaný (c) časový průběh bitové sekvence	58
Obr. 8.1: Závislost CD na vlnové délce	60
Obr. 8.2: Závislost CD na vlnové délce	61

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: Hodnoty koeficientů útlumu (vlákno G.652) dle [12]	21
Tab. 1.2: Hodnoty koeficientů útlumu (vlákno G.655) dle [15]	23
Tab. 1.3: Hodnoty koeficientů útlumu pro vlákno G.657.A dle [20].....	24
Tab. 1.4: Hodnoty koeficientů útlumu pro vlákno G.657.B dle [20].....	24
Tab. 4.1: Limity chromatické disperze dle [21].....	34
Tab. 4.2: Limity PMD dle [22]	38
Tab. 7.1: Nastavení parametrů prvků použitého přenosového systému	52
Tab. 7.2: Naměřené hodnoty chybovosti BER pro různé přenosové rychlosti	52
Tab. 7.3: Parametry použitého DCF vlákna.....	56
Tab. 7.4: Parametry použité FBG mřížky.....	57
Tab. 8.1: Naměřené hodnoty CD reflektometrickou metodou.....	59
Tab. 8.2: Naměřené hodnoty CD metodou fázového posuvu	61

ÚVOD

V současné době, která si žádá stále přesnější a výkonnější přenosové technologie, jsou současná nejrozšířenější metalická vedení (UTP, STP) nahrazována optickými. Prakticky veškeré dálkové spoje a rozlehlé sítě jsou již dnes propojeny pomocí optických kabelů. Nepoužívají se však jen na dlouhé vzdálenosti, ale v poslední době na optiku přechází i poskytovatelé datových služeb v rámci větších měst, či oblastí (označováno jako přístupová síť).

Důvodem jsou stále vzrůstající požadavky na rychlost a kvalitu přenosu. Uživatelé žádají okamžitý přístup k datům a informacím, a to s nejvyšší možnou spolehlivostí. Možnosti metalických kabelů však již na tyto požadavky nejsou dostačující. Záchranou v této situaci jsou právě optické sítě, jejichž šířka využitelného přenosového pásma mnohonásobně převyšuje klasické metalické. Nejsou jen výhodnou podporou současných služeb, ale také velmi perspektivní technologií pro budoucnost. Počáteční náklady na vybudování optické sítě jsou vyšší než na síť metalické, provozní náklady jsou však nižší a z dlouhodobějšího hlediska je návratnost prakticky jistá. Dá se říct, že tato technologie je stále ještě nová a neustále se vyvíjí. V současnosti jsou maximální dosažitelné rychlosti po optických vláknech pouze teoreticky odhadovány řádově na THz, a to kvůli omezeným možnostem zdrojů a detektorů.

Jak je tedy vidět, jedná se o perspektivní technologii, která s postupným vývojem moderní společnosti ještě mnohé nabídne.

Jako každá technologie, i tato se setkává s určitými překážkami a omezeními. Na přenos signálu optickým vláknem působí řada nežádoucích jevů, které je třeba v rámci možností potlačovat pro bezproblémový příjem v koncové stanici. Používají se různé kompenzační metody, které umožňují zvýšit dosah bezchybného přenosu moderních vysokorychlostních sítí.

V současné době jsou již také k dispozici různé simulační programy. Tyto programy lze s výhodou použít při návrhu optických tras. V simulačním prostředí je možné navržené trasy otestovat a odladit případné chyby ještě před samotnou výstavbou. Pro porovnání kompenzačních metod v této práci byl použit program OptiSystem od firmy OptiWave.

1 PRINCIP OPTICKÉHO PŘENOSU A TYPY OPTICKÝCH VLÁKEN

1.1 Princip optického přenosu

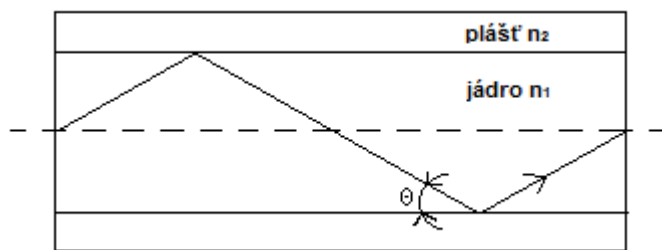
Tím nejzákladnějším rozdílem mezi metalickými a optickými kabely je způsob přenosu informace. V metalických kabelech je informace přenášena pomocí elektrických signálů, zatímco v optických kabelech se o přenos stará světelný paprsek.

V optickém vlákně jsou nositelem signálu neutrální fotony, které na sebe vzájemně nijak nepůsobí, na rozdíl od kovové vazby, kde jsou nositelem signálu elektricky nabitě elektrony. Výhodou přenosu pomocí neutrálních fotonů oproti nabitým elektronům je, že nepodléhá vnějším rušivým vlivům, není jednoduše odposlouchatelný, a také nedochází k zpětnému ovlivňování z výstupu na vstup. Při optickém přenosu nevzniká elektrické a magnetické pole, které by mohlo vyvolávat další parazitní vazby.

Princip šíření dat optickým vláknem vychází z poznatků paprskové optiky. Konkrétně se jedná o lom světla a index lomu. Pokud světelný paprsek dopadá na rozhraní s rozdílnou optickou hustotou, tedy i s rozdílným indexem lomu, z části se odráží a vrací se zpět do prostředí původního, z části se láme a prostupuje do prostředí druhého. Veličina, která je však pro optický přenos nejdůležitější, je tzv. mezní úhel, který je charakteristický pro různá rozhraní. Pokud světlo dopadá na rozhraní pod tímto nebo menším úhlem, nedochází již k prostupu paprsku do druhého prostředí, ale k úplnému odrazu, kdy se 100% světla odrazí zpět do původního prostředí. A právě tuto vlastnost využívají optická vlákna k šíření signálů. (Obr. 1.1)

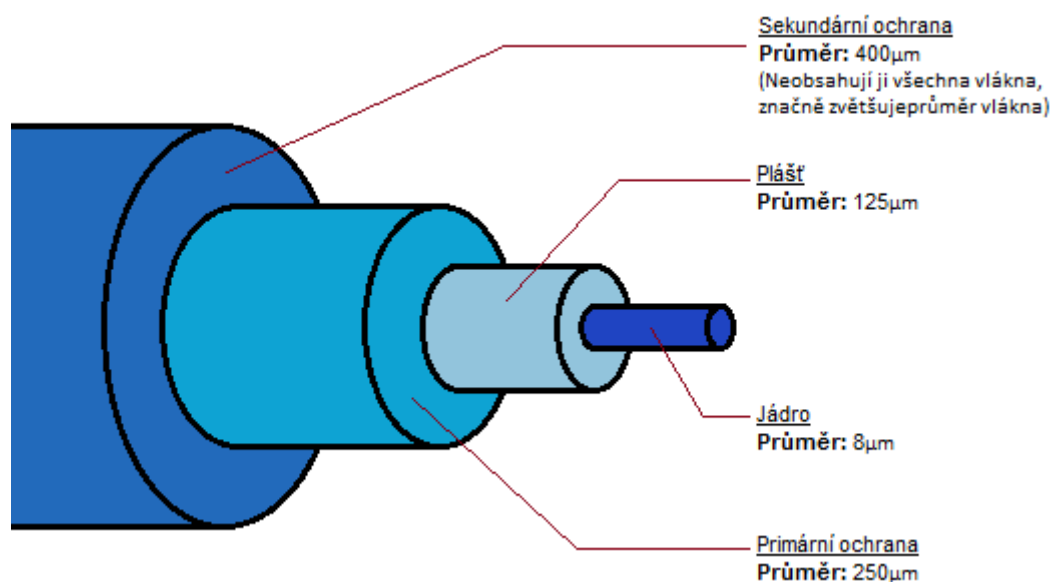
Základem optického vlákna jsou dielektrické jádro a dielektrický obal. Jádro je válcovité s indexem lomu n_1 a je obklopeno pláštěm s indexem lomu n_2 . Má-li pak docházet k úplnému odrazu na rozhraní jádro-plášť, musí být splněn předpoklad $n_1 > n_2$ a paprsky poté vstupují do jádra pod úhlem menším než Θ , kde

$$\cos \Theta = \frac{n_2}{n_1} \quad (-) \quad (1.1)$$



Obr. 1.1: Princip přenosu optickým vláknem [1]

Další důležitou vrstvou, která pokrývá plášť, je primární ochrana. Je to prvotní vrstva, která chrání vlákno před nepříznivými podmínkami okolního prostředí. Dále pak může být vlákno chráněno sekundární plastovou ochranou a dalšími vrstvami navazujícími, které zvyšují odolnost proti mechanickému namáhání nebo chemickému působení prostředí. Jednotlivé vrstvy znázorňuje Obr. 1.2.



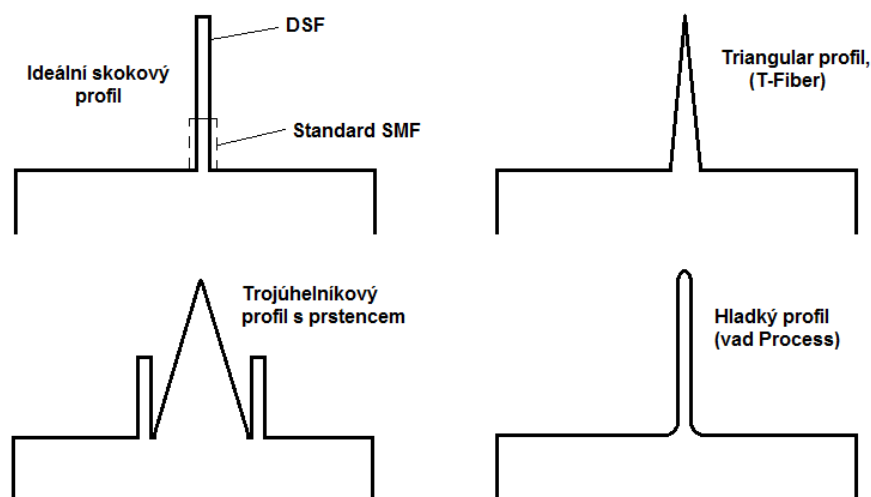
Obr. 1.2: Stavba optického vlákna [6]

Základem optického spoje je modulovaný zdroj záření, optické prostředí a přijímač záření. Vzhledem k tomu, že vstupní a výstupní signál optického spoje je elektrický, obsahují obě strany kromě optických soustav také obvody elektrické pro zpracování těchto signálů. Zdrojem světla v optickém spoji může být LED dioda nebo laser. Záření je modulováno pomocí optického modulátoru nebo změnou budícího proudu u polovodičového zdroje. Přijímač na druhém konci pak přijatý světelný signál mění zpět na elektrický. [1] [5]

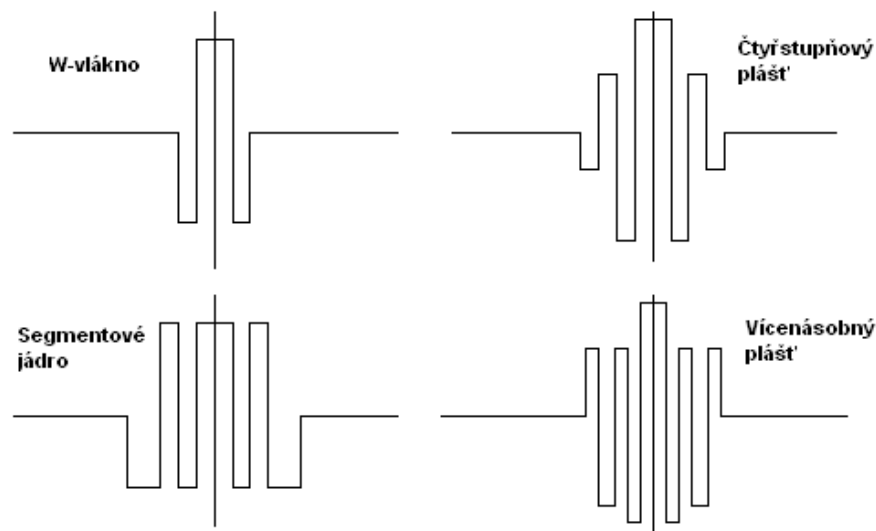
1.2 Druhy optických vláken

Existují dva základní druhy optických vláken, a to jednovidová a mnohovidová. Liší se technologií přenosu. V mnohovidových vláknech se šíří větší počet vidů (oproti jednovidovým, kde se šíří pouze jeden dominantní vid LP01). To je způsobeno tím, že mají větší průměr jádra a díky tomu se dostane do vlákna větší množství světla. Mnohovidová navíc ještě mohou mít skokový index lomu jádra a pláště, nebo gradientní s proměnným indexem lomu. Jednovidová vlákna jsou zase charakteristická tím, že změníme-li index lomu, dochází k posunu disperzní charakteristiky. [1]

Následující obrázky znázorňují různé průběhy indexů lomu. Na obrázku 1.3 jsou znázorněny průběhy vláken s posunutou disperzí, na obrázku 1.4 jde o vlákna s rovnou disperzní charakteristikou (DFF).



Obr. 1.3: Průběhy indexů lomu vláken s posunutou disperzí



Obr. 1.4: Průběhy indexů lomu vláken s rovnou disperzní charakteristikou

1.2.1 Mnohovidová optická vlákna

U mnohovidových vláken je průměr jádra větší, a to typicky 50 a 62,5 μm. Čím širší je vlákno, tím více je vidů, které se mnohou vláknem šířit. Může se jednat až o tisíce vidů. Tato vidová disperze omezuje šířku pásma, a to asi na 50 MHz/km. Jako generátor světla zde může být použita obyčejná LED dioda, ta vytváří impulzy, složené z několika paprsků (vidů). Jednotlivé vidy se při průchodu vláknem odráží pod různými úhly a cestují po různých drahách. K detektoru pak vidy dorazí s určitými zpožděními mezi sebou, toto se nazývá vidovou disperzí. Protože zkreslení vzrůstá s rostoucí délkou vlákna, používají se tato vlákna na krátké trasy zhruba do 2 km. Tato technologie je levnější, protože není potřeba používat tak přesné přístroje (PIN detektor), jako u jednovidového vlákna. Typickými vlnovými délkami jsou 850 nm a 1310 nm.

Existují také gradientní mnohovidové světlovody, kde se využívá změny indexu lomu $n = n(x)$ průřezu jádra v příčném směru, podle 1.2.

$$n = n_0(1 - \alpha^2 x^2) \quad (-) \quad (1.2)$$

Vlákna jsou tvořena z tenkých vrstev a ty se liší indexem lomu, který se zmenšuje se zvětšující se vzdáleností od osy jádra. Umožňují tak podstatné snížení vidové disperze, jednotlivé paprsky dorazí k detektoru téměř ve stejné okamžiky.

[1] [3] [4]

1.2.2 Jednovidová optická vlákna

Jak už název napovídá, u jednovidových vláken je signál tvořen pouze jedním videm (paprskem). To je umožněno malým průměrem jádra, pouhých 9 μm. Jednovidová vlákna dosahují menšího útlumu, vyznačují se tím, že se u nich neuplatňuje vidová disperze a díky tomu poskytují větší šířku přenosového pásma. Kvůli malému průměru jádra je však zapotřebí přesnějších, kvalitnějších, a tím pádem i dražších generátorů a detektorů. Pro generování paprsků se u jednovidových vláken používají polovodičové lasery v kombinaci s APD detektory. Použití těchto vláken je vhodné pro delší vzdálenosti a vysoké přenosové rychlosti.

[1] [3] [4]

1.2.3 POF – plastic optic fiber

Mimo výše zmíněná skleněná jednovidová a mnohovidová vlákna existují také plastová optická vlákna (POF). Tato technologie není novinkou, původní uplatnění měla převážně v automobilovém průmyslu. Využívají ji automobilové sítě na krátké vzdálenosti. Sběrnice MOST (Media Oriented Systems Transport) má však kromě omezeného dosahu také nižší přenosové rychlosti (28MBit/s s možným vylepšením až na 56 – 155 MBit/s).

Vývoj tohoto druhu vláken však zaznamenal v posledních letech značný vývoj. V roce 2006 bylo založeno sdružení firem (např. AMCC, Avago Technologies, Motorola a další) s názvem POFTO (Plastic Optic Fiber Trade Organization), toto sdružení již po měsíci fungování ohlásilo úspěšný datový přenos 10Gb/s na vzdálenost 100m. Jedná se totiž o výhodné řešení v oblasti přístupových sítí a to převážně z důvodu nižších finančních nákladů oproti skleněným vláknům. Ukázalo se, že nejnákladnější částí optické sítě je právě část spojující páteřní síť a jednotlivé uživatele. Přenos 10Gb/s pomocí POF je sice jen na 100m, ale tato vzdálenost je právě pro přístupové sítě dostačující. Cena komponent je o 50% nižší, než u klasických skleněných vláken a potřebný výkon až o 75%.

Běžné POF má stupňovitý index lomu a šířka pásma je omezena 30Mhz na 100m. Má větší průměr než vlákno skleněné, a to běžně až 1mm. S tím je spojen větší útlum (0,15-0,2dB na metr při 650nm). Díky většímu průměru a ohebnějšímu materiálu je však více mechanicky odolné. Jeho výhodou je také to, že umožňuje snadné konektování, takže je montáž možná bez drahých nástrojů.

Vyšší gigabitové rychlosti však využívají modernější POF s gradientním indexem lomu (GI-POF, Graded-Index POF). Tato technologie nabízí šířku pásma 2Ghz na 100m na vlnové délce 850nm. [8] [9] [10] [11] [12]

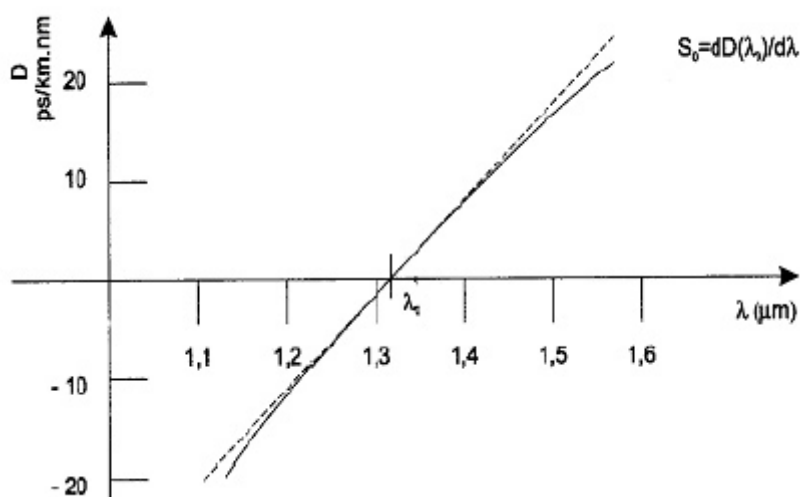
1.3 Typy optických vláken

Existuje množství typů optických vláken, které se od sebe odlišují některými vlastnostmi jako například útlumem nebo charakteristikou chromatické disperze. Jednotlivými typy optických jednovidových vláken se zabývají doporučení ITU G.650-G.659. Tato doporučení popisují geometrické, mechanické a přenosové vlastnosti optických vláken. V současnosti jsou běžně provozované vlnové délky 1550nm s typickým útlumem 0,35dB/km, 1310nm (upstream) s útlumem

0,2dB/km a 1490nm (downstream) s útlumem 0,2dB/km (platí pro přenos jedním vláknem, při použití 2 vláken pro každý směr se používají většinou 1310nm, záleží na provozovateli).

Typ G.652

Jedná se o standardní jednovidové optické vlákno, které má nulovou chromatickou disperzi na vlnové délce kolem 1310nm. Průměr jádra vlákna je 9μm a průměr pláště 125μm. Vlákno bylo původně optimalizováno právě pro oblast vlnových délek 1310nm, může být ovšem použito i v oblasti 1550nm. Po tomto vlákně může probíhat jak analogový, tak digitální přenos. Na obrázku 1.5 je znázorněna závislost koeficientu chromatické disperze na vlnové délce pro tento typ vlákna. [2] [12]



Obr. 1.5: Závislost koeficientu chromatické disperze na vlnové délce pro vlákno G.652 dle [16]

Jak je ze závislosti vidět, hodnoty koeficientu D jsou nad hodnotou nulové chromatické disperze λ_0 kladné (nazývaná také oblast s anomální chromatickou disperzí), to také znamená, že delší vlnové délky se ve vakuu zpožďují oproti kratším vlnovým délkám. Pro oblast pod hodnotou λ_0 , kde je koeficient D záporný (také oblast s normální chromatickou disperzí), je tomu právě naopak. [16]

Důležitou vlastností optických vláken je také útlum. Tabulka 1.1 uvádí typické hodnoty koeficientů útlumu pro vlákno typu G.652.

Koeficient útlumu	Oblast vlnových délek	Typická hodnota spoje
(*Poznámka)	1260nm – 1360nm	0,5dB/km
	1530nm – 1565nm	0,275dB/km
	1565nm – 1625nm	0,35dB/km
*Poznámka: Typická hodnota spoje souhlasí s koeficientem útlumu spoje použitým v ITU-T doporučení G.957 a G.691.		

Tab. 1.1: Hodnoty koeficientů útlumu (vlákno G.652) dle [12]

Samotné vlákno typu G.652 má několik provedení, a to:

G.652.A má vlastnosti potřebné pro aplikace například 10Gbit/s Ethernetu, až do 40km [16]

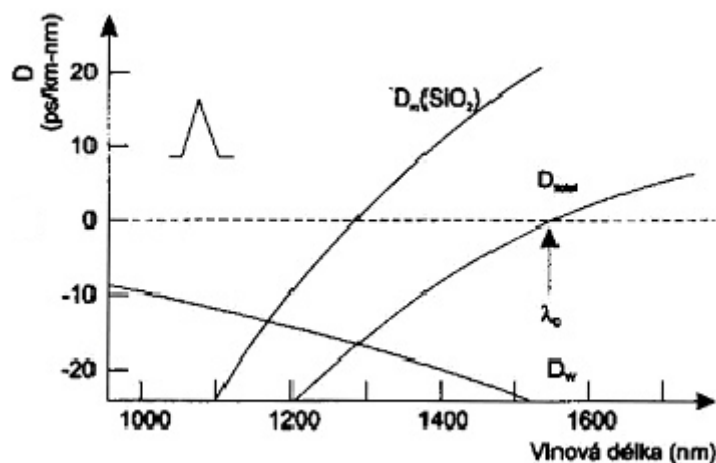
G.652.B svými vlastnostmi vyhovuje vyšším přenosovým rychlostem. [16]

G.652.C je zase novým typem vlákna. Toto vlákno lze použít v celém rozsahu vlnových délek a zároveň také využít všechna dostupná přenosová pásma, což klasické vlákno G.652 nedovoluje. Využitelné je i pásmo E (1360-1460nm), které mělo u klasických vláken zvýšený vložný útlum způsobený zbytkovými ionty vody OH^- z výroby. [2]

G.652.D jedná se o All Wave vlákno, tedy jako u předchozího použitelné v celém rozsahu vlnových délek. Vlákno je kompatibilní se všemi vlákny uvedenými v doporučení G.652 [2]

Typ G.653

Vlákno tohoto typu bylo vyvinuto se snahou snížit hodnotu chromatické disperze v oblasti vlnových délek 1550nm. Jedná se tedy o vlákno s posunutou disperzní charakteristikou (DSF – Dispersion Shifted Fiber), a to tak, že hodnota nulové chromatické disperze je posunuta právě do oblasti 1550nm. Vlákno našlo uplatnění při větších rychlostech a na velké vzdálenosti, avšak jen pro jedinou vlnovou délku. Když však nastal okamžik, kdy bylo potřeba nasadit na tato vlákna systém vlnového multiplexu DWDM, bylo zjištěné, že tato vlákna mají vedlejší efekt, kdy v oblasti nulové chromatické disperze dochází k vzájemnému ovlivňování mezi kanály. Toto je způsobeno vlivem nelineárních jevů, převážně pak díky čtyřvlnnému směšování FWM (Four Wave Mixing), viz kap. 3. Následující obrázek 1.6 zobrazuje průběh chromatické disperze toho vlákna v porovnání s vláknem G.652 (levá křivka procházející nulovou hodnotou na 1310nm).



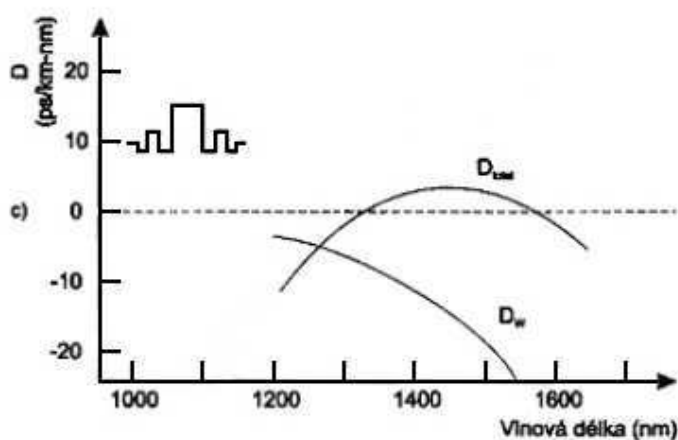
Obr. 1.6: Závislost koeficientu chromatické disperze na vlnové délce pro vlákno G.653 (v porovnání s G.652) dle [16]

Maximální koeficient útlumu vlákna typu G.653 na vlnové délce 1550nm je 0,35dB/km a při jeho využití v oblasti 1310nm obecně neklesá pod 0,55dB/km. [13]

Typ G.654

Je speciálně vyvinutou, avšak nákladnou verzí vlákna G.652, proto není příliš využíváné. Jedná se vlákno s plochou disperzní charakteristikou, které se vyznačuje nízkou hodnotou chromatické disperze v rozmezí 1310-1550nm vlnových délek. Zároveň také dosahuje nulové hodnoty chromatické disperze právě na vlnových délkách 1310nm a 1550nm. Svoje uplatnění nachází převážně pro podmořskou kabeláž bez použití zesilovačů na trase.

Obrázek 1.7 zobrazuje průběh ploché disperzní charakteristiky tohoto vlákna. Jeho útlum dosahuje při vlnové délce 1550nm maximální hodnoty 0,22dB/km. [13]

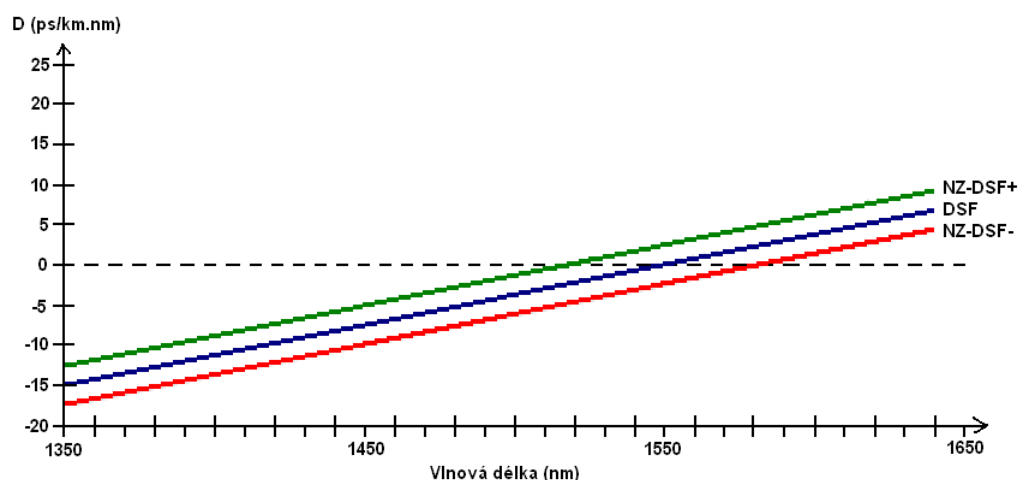


Obr. 1.7: Závislost koeficientu chromatické disperze na vlnové délce pro vlákno G.654 dle [16]

Typ G.655

Toto doporučení popisuje vlákna, která mají v oblasti kolem 1550nm (konkrétně 1530nm – 1565nm) nenulový koeficient chromatické disperze, jsou to tedy vlákna s posunutou nenulovou chromatickou disperzí (NZ-DSF, Non Zero – Dispersion Shifted Fiber). Vlákna jsou používána především v dálkových optických spojích a pro vysoké přenosové rychlosti. Rozdíl oproti typu G.653 spočívá v tom, že právě v oblasti kolem 1550nm nemají nulovou disperzi, což je nutné při zavádění technologie DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), aby se příliš neprojevovaly rušivé nelineární jevy.

Jejich charakteristika je podobná předchozímu typu (G.653), avšak nulová hodnota chromatické disperze leží mimo oblast určenou pro přenos. Průběh zobrazuje obrázek 1.8, kde je vyznačena posunutá kladná (NZ-DSF+) a záporná (NZ-DSF-) nenulová chromatická disperze v porovnání s průběhem posunuté chromatické disperze vlákna G.653 (DSF), s protínající nulovou hodnotu na 1550nm. Tabulka 1.2 pak uvádí typické hodnoty koeficientů útlumu pro toto vlákno. [16] [2]



Obr. 1.8: Závislost koeficientu chromatické disperze na vlnové délce (vlákno G.655 v porovnání s G.653) [23]

Koeficient útlumu	Oblast vlnových délek	Typická hodnota spoje
(*Poznámka)	1530nm – 1565nm	0,275dB/km
	1565nm – 1625nm	0,35dB/km
*Poznámka: Typická hodnota spoje souhlasí s koeficientem útlumu spoje použitým v ITU-T doporučení G.957 a G.691.		

Tab. 1.2: Hodnoty koeficientů útlumu (vlákno G.655) dle [15]

Typ G.657

Jedná se o doporučení, které definuje vlákna pro vysokokapacitní přenos v rámci rychle se rozvíjejících širokopásmových přístupových sítí. Typ G.657 v podstatě vylepšuje G.652. Reaguje na odlišné nároky optických přístupových sítí a optimalizuje výkonové charakteristiky. Použití v rámci přístupových sítí si díky omezenému prostoru a neustálým manipulacím s kabeláží žádá operátorsky přívětivý výkon vlákna a malou náchylnost na mikroohyby. Právě s těmito vylepšeními přichází G.657. [20]

Vlákno je provedeno ve dvou třídách:

G.657.A je plně vyhovující G.652 jednovidovým optickým vláknům a lze jej použít i v jiných než přístupových částech sítě. Užívá se pro vnitřní kabeláže. Kompatibilita s G.652 je výhodná v tom, že při svařování těchto dvou typů nedochází ke zvýšení útlumu, jako by tomu bylo například při svařování G.652 a G.653. Typické hodnoty koeficientů útlumu uvádí tabulka 1.3.

G.657.B není nezbytně vyhovující G.652, avšak je schopné velmi nízkých hodnot mikroohybových útlumů velmi malých radiusů. Je převážně používáno pro vnitřní kabeláže. Typické hodnoty koeficientů útlumu uvádí tabulka 1.4.

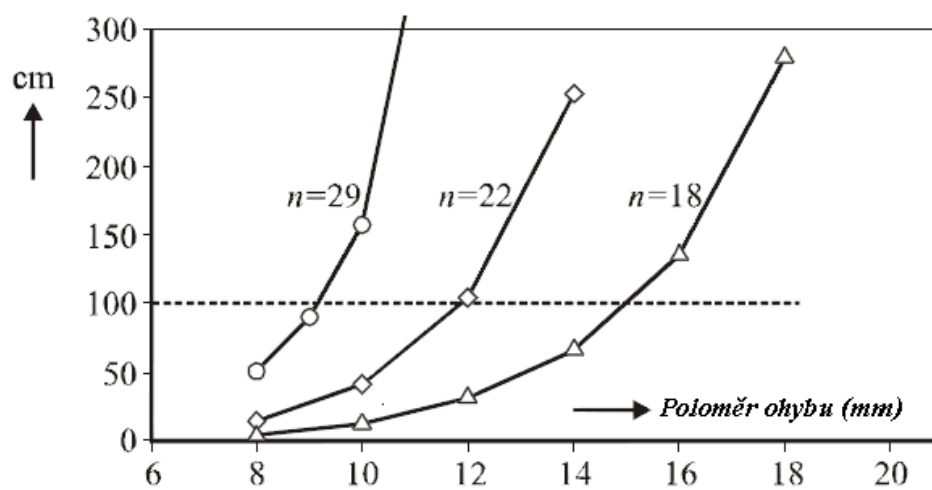
Obrázek 1.9 zobrazuje maximální dovolené ohyby vláken G.657.

Koeficient útlumu	Oblast vlnových délek	Hodnota
(*Poznámka)	Maximum pro 1310nm – 1625nm	0,4dB/km
	Maximum pro 1383nm ± 3nm	*Poznámka
	Maximum pro 1550nm	0,3dB/km
*Poznámka: Vzorkovaný koeficient útlumu má být menší nebo rovný maximu pro rozsah vlnových délek 1310nm – 1625nm.		

Tab. 1.3: Hodnoty koeficientů útlumu pro vlákno G.657.A dle [20]

Koeficient útlumu	Oblast vlnových délek	Hodnota
(*Poznámka)	Maximum pro 1310nm	0,5dB/km
	Maximum pro 1550nm	0,3dB/km
	Maximum pro 1625nm	0,4dB/km

Tab. 1.4: Hodnoty koeficientů útlumu pro vlákno G.657.B dle [20]



Obr. 1.9: Maximální dovolené ohyby pro vlákno G.657 dle [20]

2 KABELY A OPTICKÉ SPOJE

2.1 Optické kabely

Jak již bylo řečeno, základem optické sítě je optické vlákno, které obsahuje několik vrstev. Jsou to: jádro, obal, primární a sekundární ochrana. Vlákna jsou vyráběna z oxidu křemičitého SiO_2 (tedy křemičitého skla) a případně dalších příměsí jako například germaniového nebo křemenného skla. Různé příměsi pak mění vlastnosti vlákna, příkladem může být index lomu. Primární ochrana je z akrylátové pryskyřice a je nalisovaná přímo na optickém vlákne.

Vlákna se pak sdružují v optické kabely. Tyto kabely mohou obsahovat od desítek až po více jak sto optických vláken v závislosti na druhu kabelu a jeho použití. Kabely obsahují další vrstvy a ochrany podle podmínek, ve kterých mají být použity. Existují kabely pro venkovní a vnitřní použití, samonosné, speciální, univerzální kabely a jiné.

Příkladem mohou být kabely od firmy Samsung, a to například SJSA (pro zakopání do země), PREMISE LSOH MINI BREAKOUT (pro vnitřní použití) nebo F8 LOOSE TUBE (pro venkovní zavěšení, obsahuje ocelové lanko). [7]

2.2 Optické spoje

I přes všechny možné ochrany může samozřejmě dojít k poškození optického vlákna; nebo je potřeba vlákna spojit z nějakého jiného důvodu (především při výstavbách optických tras, protože kabely jsou prodávány v určitých délkách).

K dispozici je několik způsobů spojování optických vláken, které se v základu dělí na nerozebíratelné spoje (sváry, mechanické spojky) a rozebíratelné spoje (konektory).

2.2.1 Nerozebíratelné spoje

Optická vlákna se nejčastěji spojují pomocí tavného svařování. Z několika metod se nejčastěji používá svařování elektrickým obloukem, méně pak plynový plamen nebo CO_2 laser. Ke svařování se používá speciálních svářeček. Ty mohou být poloautomatické nebo dnes moderní automatické, řízené mikropočítačem.

Existují i další možnosti spojování. Například slepování nebo spojování pomocí spojek, jako je systém FibrLok II od firmy 3M, bez potřeby sváření. [2]

2.2.2 Rozebíratelné spoje

Rozebíratelné spoje se realizují za pomoci konektorů, těch je obrovské množství. Používají se převážně v ústřednách nebo místech s opakovacími zesilovači. V současné době jsou nejběžnější typy SC (používané v media konvertorech), LC (bývají jako samostatné simplexní, či v páru duplexní), ST nebo E2000 (používá O2), které mají integrovanou záklopku, která zabraňuje vyzařování optického signálu, pokud není vlákno zapojeno.

V terénu je však snazší použít tzv. pigtail než přímé konektorování konce vlákna. Pigtail je část optického vlákna s již připojeným konektorem, spojuje se přímo s optickým vláknem a svár (obecně spoj), je umístěn do optické vany, přičemž je vyústěn z optické vany a připojen do zařízení. Podobně jako hotové UTP kabely u metalického vedení, jsou v optických sítích k dispozici tzv. patch cordy, což jsou simplexní nebo duplexní kabely s připevněnými konektory pro použití na krátké vzdálenosti a propojení prvků optické sítě. [2]

2.2.3 Svařování optických vláken

Před samotným svářením musí být oba konce vlákna zbaveny primární ochrany a dokonale očištěny izopropylalkoholem (IPA) od všech nečistot. Součástí svářečky bývá i kamera, snímající kolmý detail konců vláken. Pro co nejlepší svár musí být znám bod tavení skla, dále také čas natavení konce vlákna.

Jemným přibližováním nebo oddalováním je nastavena optimální vzdálenost. Důležité je i vhodné nastavení energie svářecího oblouku, aby bylo dosaženo co nejlepšího spoje. Po procesu svařování proběhne test mechanických vlastností a také velmi důležitý test útlumu vytvořeného spoje. Pokud není vyhověno určitým požadavkům, vlákno musí být zalomeno a celý proces sváření zopakován. Místo sváru je pak samozřejmě náchylnější k poškození, chrání se proto pomocí smrštitelných bužírek. Svařená vlákna se pak umísťují do optických kazet a ty pak dále například v tzv. optických vanách. [2]

3 VÝHODY, NEVÝHODY A OMEZENÍ OPTICKÝCH PŘENOSŮ

Jako každá technologie, tak i technologie optických vláken má své výhody, ale i nevýhody. Pokud jde o výhody, je jejich výčet poměrně jednoduchý a jasný. Víceméně byly zmíněny již v úvodu. Převážně se jedná o to, že tato technologie nabízí vysoké rychlosti, lze pomocí ní zajistit kvalitní a spolehlivý přenos. Má toho mnoho co nabídnout nejen v rozvíjející se moderní společnosti, ale postupně s dalším pokrokem toho bude moci mnoho nabídnout i v budoucnosti.

Budeme-li mluvit o nevýhodách a omezeních, je jejich seznam a popis poněkud rozsáhlejší a právě na ně se zaměří tato kapitola. Bude se jednat o složky útlumu, kam patří různé druhy ztrát, absorpce a materiálový rozptyl, který lze rozdělit na lineární a nelineární jevy. Patří sem samozřejmě i všechny druhy disperzí, těm je však věnována následující samostatná kapitola. [2] [18]

3.1 Ztráty absorpcí

K těmto ztrátám řadíme materiálovou absorpci, ta souvisí jak s materiálem, ze kterého jsou vlákna vyrobena, tak i s jejich samotnou výrobou. Ztráty jsou způsobeny příměsí nečistot, jako jsou ionty železa, mědi nebo chromu, jejichž přítomnost snižuje optický výkon tepelnými ztrátami. Tepelné ztráty jsou způsobeny rezonancí příměsí na určitých kmitočtech. Materiálová absorpce se dále dělí na absorpci vlastní a nevlastní.

Vlastní absorpce nastává tím, že procházející světlo působí na vlastní stavební atomy. Patří sem absorpce v ultrafialové oblasti, která je neodstranitelná, absorpce v infračervené oblasti, která se dá řešit náhradou jiných materiálů, které světlo nerozkmitá a také malou absorpcí vlastního materiálu, ze kterého je vlákno vyrobeno.

Nevlastní absorpce tvoří hlavní podíl na ztrátách. Je způsobena ionty vody OH, které se dostanou do vlákna také již při výrobě. Mimo to způsobuje přítomnost OH i mikrotrhliny ve vlákně, které mohou vést k praskání vlákna. [2] [18]

3.2 Materiálový rozptyl

3.2.1 Lineární jevy

Mezi lineární jevy působící na přenos po optickém vlákne patří Rayleighův rozptyl. Je to dominující jev, vznikající vlivem drobných nečistot, které jsou velmi malé oproti vlnové délce. Tento jev nelze odstranit, je nepřímo úměrný čtvrté mocnině vlnové délky záření, které se přes vlákno šíří. Ztráty tímto jevem prudce narůstají směrem k oblasti ultrafialového záření a je pro něj charakteristická všesměrovost.

Dalším jevem patřícím mezi lineární je Mie rozptyl. Na rozdíl od předchozího jevu, Mie rozptyl vzniká vlivem nečistot velikostně srovnatelných s vlnovou délkou. Je způsoben nedokonalou geometrií vlákna a změnami průměru jeho jádra. Jedná se tedy o vady způsobené při výrobě, které jsou odstranitelné zdokonalením výrobního procesu. [2] [18]

3.2.2 Nelineární jevy

Nutnost začít řešit problém nelineárních jevů se dostavila až v posledních letech. Dříve se řešily hlavně komplikace spojené s útlumem nebo nanejdvůš s disperzemi, s problémy nelineárních jevů se návrháři setkávali jen u speciálních aplikací, jako například u podmořských instalací.

Vznik nelineárních jevů je spojen se stále narůstajícími nároky na optická vlákna. Konkrétně jde o to, že jádra vláken jsou velmi úzká a s příchodem vlnového multiplexu, kdy jsou do trasy navíc zařazovány optické zesilovače, je nárůst výkonu, který musí tenké vlákno zvládnout, obrovský. Pokud je vlákem vedeno více kanálů, výkon jednotlivých laserů musíme sčítat. Největším problémem je závislost indexu lomu na výkonu, procházejícím materiálem. Závislost indexu lomu jádra na procházejícím výkonu, vyjadřuje vztah 3.1.

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{eff}}, \quad (-) \quad (3.1)$$

kde n_0 je hodnota indexu lomu jádra vlákna při nízkých úrovních optického výkonu, n_2 je koeficient nelineárního indexu lomu (pro křemík je to hodnota $2,35 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{s}$), P je optický výkon ve W a A_{eff} je efektivní plocha jádra vlákna v m^2 .

Mezi nelineární jevy se řadí následující:

Stimulovaný rozptyl - nastává při srážkách světelné vlny s kmitajícími (tepelně nebo akusticky) atomy vlákna a dochází při něm k rozptylu této vlny a posunu vlnových délek k vyšším hodnotám.

Brilluinův rozptyl (Stimulated Brillouin Scattering - SBS) – je prvním z důsledků stimulovaného rozptylu. Udává horní limit pro množství energie, která může být vyslána bezetrátově vláknem. Je-li limit překročen, významné množství přenášeného signálu je přesměrováno zpět do vysílače. Výsledkem je jev, kdy zpětná rozptýlená vlna o nadkritickém výkonu (posunutá spektrálně přibližně o 10GHz) interaguje s akustickými vlnami ve vlákně. Brilluinův rozptyl se daří potlačit rozšířením spektra signálu.

Ramanův rozptyl (Stimulated Raman Scattering - SRS) – není takovým problémem jako SBS, jeho prahová hodnota se totiž blíží 1W, což je mnohokrát více než u SBS. Jedná se o vzájemnou interakci šířící se světelné vlny se samotným prostředím, ve kterém se šíří. Důsledkem je frekvenčně posunutá rozptýlená vlna, která se šíří jak v dopředném, tak ve zpětném směru. Ramanův jev je však i využitelný v jednovidových vláknech jako zesilující prvek.

Čtyřvlnné směšování (Four-wave mixing - FWM) – je jev, který je vázaný například na systémy vlnového multiplexu, kde se vláknem šíří několik souběžných signálů různých vlnových délek. Souběžné signály spolu interagují a vznikají další signály o nových vlnových délkách. Jedná se o podobný jev, kdy při modulaci elektrického signálu vznikají intermodulační produkty. Jevo může být zmírněn použitím nestejných rozestupů mezi jednotlivými kanály.

Vlastní fázová modulace (Self-Phase modulation - SPM) – je jev, kdy optický impulz šířící se vláknem působí sám na sebe. Souvisí s energetickou závislostí indexu lomu jádra. Signál je zkreslován díky vzrůstajícímu a klesajícímu výkonu na hranách impulzů, protože dochází ke změnám fáze šířícího se signálu. SPM způsobuje chybovost přenosu.

Křížová fázová modulace (Cross-phase modulation - XPM) – je jevem, který je velmi podobný SPM, až na to, že k XPM jsou potřeba dva impulzy (SPM potřebuje pouze jeden). Znamená to tedy, že při XPM signál jedné vlnové délky fázově

moduluje signál na jiné vlnové délce. Jev se tedy projevuje v systémech, které pracují s více kanály (např. DWDM).

Vzájemná modulace (Intermodulation, Mixing) – je vcelku podobná SPM a XPM. Uvažujeme dva světelné zdroje, kde každý z nich vysílá na jiné frekvenci a index lomu vlákna se mění společně se vzrůstajícím a klesajícím výkonem. Jak se index lomu mění v závislosti na jednotlivých frekvencích zdrojů, objevují se nové frekvence. **[2] [19]**

4 DRUHY DISPERZÍ V OPTICKÝCH VLÁKNECH A JEJICH VLIV NA VYSOKORYCHLOSTNÍ PŘENOS OPTICKOU SÍTÍ

4.1 Definice disperze

Disperze je jedním z nepříznivých vlivů, které působí na přenos signálu optickým vláknem. Právě disperze je jevem, který nejvíce přispívá ke zkreslení přenášeného signálu. Jedná se o rozptyl světelné energie v časové oblasti. Zjistíme-li šířku impulsu v polovině jeho výšky na konci a na začátku trasy, kterou prošel, pak jejich rozdíl definuje disperzi. Velikost vlivu disperze je přímo úměrná délce vlákna, kterým světelný paprsek prochází. [2]

4.2 Složky disperze

Jestliže mluvíme o disperzních vlivech na vysokorychlostní přenos optickou sítí, nejedná se pouze o jeden konkrétní jev. Existuje několik druhů disperze a míra jejich vlivu na přenos signálu záleží na druhu a typu vlákna.

4.2.1 Vidová disperze (Mode Dispersion, $D_{\text{MOD}}(\lambda)$)

Vidová disperze se výrazně projevuje převážně u mnohovidových vláken se skokovou změnou indexu lomu. Omezuje šířku přenosového pásma a má za následek zkreslení signálu, nedochází však ke ztrátě energie.

K vidové disperzi dochází v průběhu cesty paprsku mnohovidovým vláknem. Jednotlivé paprsky totiž vstupují do vlákna pod různými úhly a to má za následek rozdílnou rychlost jejich šíření, vidy tak dorazí k detektoru v časových rozestupech. Výsledkem je rozšířený signál, který vznikne interferencí jednotlivých vidů, což přesahuje rozhodovací úroveň. Detektor totiž nedokáže rozlišovat jednotlivé vidy, ale pouze součet světelnosti. Čím větší je tedy disperze a tím pádem zkreslení, tím těžší je pro detektor znovu správně rekonstruovat původně vyslaný signál.

Časový rozestup mezi vidy je dán rozdílem jejich skupinových zpoždění. Následující rovnice definuje vztah mezi videm, který se šíří v ose vlákna a videm, který se šíří po trajektorii svírající s osou vlákna určitý úhel (ϑ), platí

$$\Delta t_{\text{vid}} = \frac{t_s}{\cos\vartheta} - t_s = t_s \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = t_s \Delta = \frac{n_s}{c_0} \Delta \quad (\text{s}) \quad (4.1),$$

kde t_s - je skupinové zpoždění (viz. 4.12); Δ – je relativní změna indexu lomu (4.2)

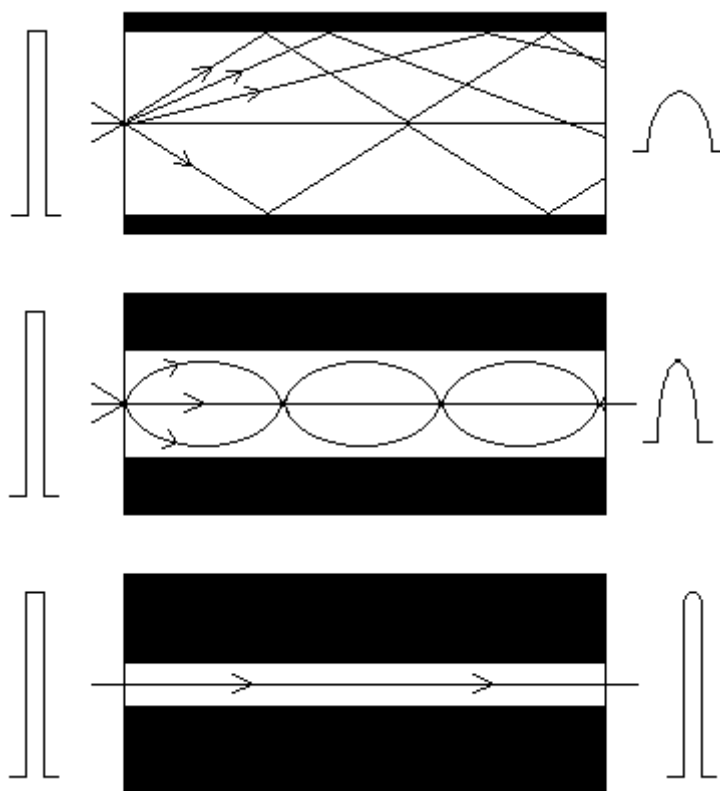
$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (-) \quad (4.2)$$

Pro mnohovidové gradientní vlákno platí

$$\Delta t_{vid} = \frac{n(0)}{c_0} \left(\frac{1-\Delta}{\sqrt{1-2\Delta}} - 1 \right). \quad (s) \quad (4.3)$$

Obrázek 4.1 znázorňuje, jaký vliv má vidová disperze na tři základní typy vláken. Jak je vidět, na jednovidová vlákna nemá vidová disperze vliv téměř žádný.

[2]



Obr. 4.1: Šíření impulzů vlákem (Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu, mnohovidové vlákno gradientní, jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu) [2]

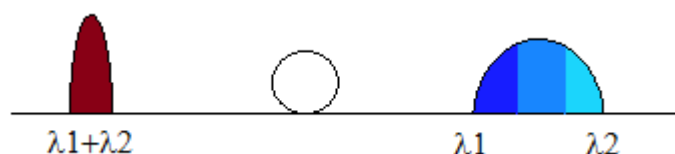
4.2.2 Celková chromatická disperze (Chromatic Dispersion, $D_{CH}(\lambda)$)

Celkovou chromatickou disperzi tvoří součet několika vlivů. Těmito vlivy jsou disperze materiálová, vlnododová (geometrická) a profilová. Tedy platí

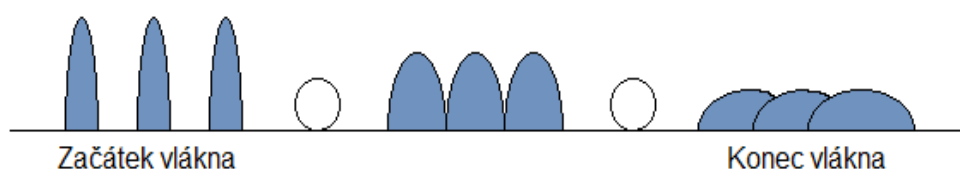
$$D_{CH}(\lambda) = D_{MAT}(\lambda) + D_{WG}(\lambda) + D_P(\lambda) \quad (\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}) \quad (4.4)$$

Chromatická disperze, na rozdíl od disperze vidové, působí i na přenos jednovidovým optickým vlákem, její účinky však nejsou tak výrazné. Ještě

nedávno nebyla ani nutnost ji měřit. Ta přišla až s technologií DWDM, kdy se vláknem šíří signál obsahující více spektrálních složek (každá na jiné vlnové délce). Příčinou jevu je fakt, že jednotlivé spektrální složky se šíří vláknem různou rychlostí, některé tedy dojdou k cíli s určitým zpožděním, jak zobrazuje obrázek 4.2. Tak dochází k deformaci původního impulzu v důsledku časového roztažení při průchodu vláknem. Může tak zasahovat do vedlejších bitových mezer, což způsobí zkreslení signálu (obrázek 4.3).



Obr. 4.2: Časové roztažení signálu v důsledku CD [16]



Obr. 4.3: Překrývání spektrálních složek v důsledku CD [16]

Velikost chromatické disperze charakterizuje tzv. koeficient chromatické disperze. Ten je definován jako závislost změny skupinového zpoždění (t_g) signálu, procházejícího vláknem, na vlnové délce (λ).

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad (\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}) \quad (4.5)$$

Vztah 4.6 uvádí podmínku nulové chromatické disperze:

$$D_{MAT}(\lambda) + D_P(\lambda) = D_{WG}(\lambda) \quad (\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}) \quad (4.6)$$

Následující tabulka 4.1 pak udává maximální hodnoty koeficientu chromatické disperze v jednotlivých oblastech vlnových délek podle ITU-T G.695. [2] [16]

λ [nm]	$D(\lambda)$ [ps.nm ⁻¹ .km ⁻¹]
1291-1351	5,7
1311-1371	6,8
1391-1451	11,5
1531-1591	19,9
1471-1611	21,1

Tab. 4.1: Limity chromatické disperze dle [21]

a) Materiálová disperse (*Material Dispersion*, $D_{MAT}(\lambda)$)

Je první složkou chromatické disperse. Jak vyplývá z názvu, je spojena s materiálem, ze kterého je vlákno vyrobeno. Dochází k ní kvůli nedokonalému složení vlákna, protože dokonale homogenní vlákno se nikdy nepodaří vyrobit. To má za následek nelineární průběh indexu lomu ve vlákne, kde se jednotlivé paprsky (na různých vlnových délkách) šíří různou rychlostí.

Fázová rychlost je dána vztahem

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c_0}{n} \quad (4.7)$$

dále skupinová rychlost

$$v_s = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{\frac{dk}{d\omega}} = \frac{c_0}{n + \frac{dn}{d\omega}} = \frac{c_0}{n_s} \quad (4.8)$$

pro skupinový index lomu n_s odvodíme vztah

$$v_s = \frac{dk}{dk_0} = \frac{d(nk_0)}{dk_0} = n + k_0 \frac{dn}{dk_0} = n + f \frac{dn}{df} = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (4.9)$$

Časový rozestup mezi spektrálními složkami je dán rozdílem jejich skupinových zpoždění podle vztahu:

$$\Delta t_{mat} = t_{s1} - t_{s2} = \left(t_s + \frac{dt_s}{d\lambda} \right) - t_s = \frac{dt_s}{d\lambda} \Delta\lambda. \quad (4.10)$$

Ze vztahů pro zpoždění (4.11) a skupinové zpoždění (4.12)

$$t_f = \frac{l}{v_f} = \frac{n}{c_0}, \quad (4.11)$$

$$t_s = \frac{l}{v_s} = \frac{n_s}{c_0} = \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \frac{l}{c_0}, \quad (4.12)$$

získáme po úpravách

$$\Delta t_{mat} = \frac{\lambda \Delta\lambda}{c_0} \frac{d^2}{d\lambda}. \quad (ps. km^{-1}. nm^{-1}) \quad (4.13)$$

[2] [16]

b) Vlnovodová disperse (Waveguide Dispersion, $D_{WG}(\lambda)$)

Vlnovodová disperse je další složkou chromatické disperse. I tato disperse má za následek rozšíření impulzů po průchodu vláknem. V tomto případě se jedná o geometrické vlastnosti vlákna, ty mají také vliv na průchod signálu tím, že mění kmitočty jednotlivých vidů a tím i rychlost jejich šíření. Vlnovodová disperse je zanedbatelná u obou druhů mnohovidových vláken, značně se však podílí na celkové disperzi u jednovidových vláken. Její hodnota je srovnatelná s disperzí materiálovou.

Vlnovodová disperse je charakterizována tzv. koeficientem vlnovodné disperse D_{vln}

$$D_{vln} = c_0 f t_{s1} \Delta \frac{dT_s}{df}, \quad (-) \quad (4.14)$$

Kde skupinové zpoždění vlny, která se šíří v ose světlovou, se skupinovým indexem lomu n_{s1} , je definováno vztahem

$$t_{s1} = n_{s1} \cdot c_0^{-1} \quad (s) \quad (4.15)$$

a normované skupinové zpoždění T_s je dáno vztahem

$$T_s = (t_s - t_{s1}) \cdot (\Delta t_{s1})^{-1}. \quad (s) \quad (4.16)$$

[2] [16]

c) Profilová disperse (Profile Dispersion, $D_P(\lambda)$)

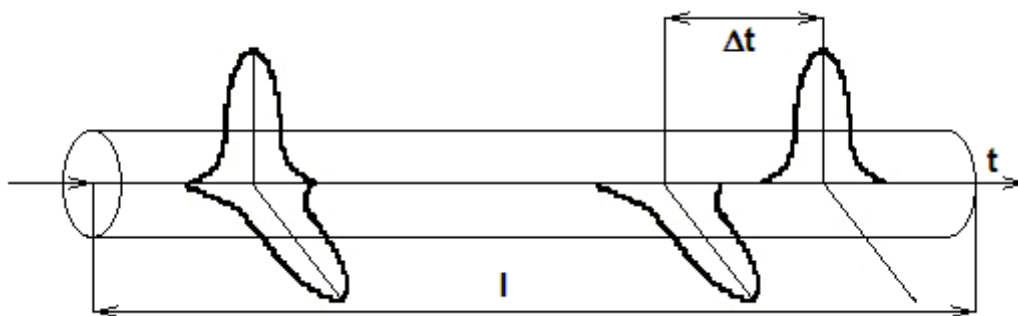
Poslední složkou chromatické disperse je disperse profilová. Její vliv je většinou zanedbatelný, výrazněji se projevuje až při vysokých přenosových rychlostech.

Zde se jednotlivé složky signálu šíří různými rychlostmi díky závislosti profilu indexu lomu jádra a pláště na vlnové délce.

4.2.3 Polarizační vidová disperse (Polarization Mode Dispersion, $D_{PMD}(\lambda)$)

Polarizační vidová disperse (PMD) je negativním jevem, který se projevuje u jednovidových optických vláken. Stejně jako v případě chromatické disperse, tak i u PMD vznikla potřeba jejího měření teprve až v poslední době s nástupem vysokých přenosových rychlostí.

V jednovídrových vláknech se světlo šíří ve dvou polarizačních rovinách, které jsou na sebe kolmé. Míra PMD je závislá na nesymetrii kruhového průřezu vlákna. Nepravidelnosti způsobují, že se jednotlivé polarizace mohou šířit různou rychlostí, což má za následek zkreslení signálu, popřípadě roztažení impulzů, stejně jako v případě chromatické disperze. Princip PMD znázorňuje obrázek 4.4.



Obr. 4.4: Princip PMD [2]

Na rozdíl od chromatické disperze, která je prakticky závislá pouze na výrobním procesu vlákna, je PMD navíc ještě ovlivněna faktory působícími při výstavbě optické trasy. Jedná se například o mikroohyby, mechanické pnutí vlákna nebo vlivy okolního prostředí, jako je např. tlak vyvolaný vrstvou zeminy, pod kterou je kabel zakopaný. Všechny tyto a mnohé další faktory mají vliv na porušení kruhové symetrie vlákna a tím pádem na zvýšení PMD. Značným problémem je také fakt, že právě okolnosti ovlivňující PMD jsou do velké míry náhodné. Polarizační roviny na sobě navíc nejsou nezávislé, ale vyměňují si po cestě vláknem vzájemně energii. Všechny výše zmíněné věci vedou k poznatku, že není možné s velkou přesností určit PMD na dané trase výpočtem.

Polarizační vidová disperze je definována koeficientem PMD. Na krátkých trasách (cca do 10km) se dá říci, že je lineární a je vyjádřena

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{l}. \quad (\text{ps.km}^{-1}) \quad (4.17)$$

l – délka trasy, $\Delta\tau$ – zpoždění signálu

Na delších vzdálenostech se již nešíří lineárně, ale s odmocninou vzdálenosti

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}}, \quad (\text{ps.km}^{-1}) \quad (4.18)$$

Tabulka 4.2 uvádí limitní hodnoty PMD dle ITU-T G.697 [2] [17]

Přenosová rychlost Gbit.s ⁻¹	0,155	0,622	2,5	10	40
SDH	STM-1	STM-4	STM-16	STM-16	STM-256
Trvání 1 bitu [ps]	6430	1610	401,88	100,47	25,12
Limit PMD [ps]	640	160	40	10	2,5
Limit PMD deklarace 1/10 [ps]	643	161	40,1	10	2,51
PMD _{koef.} Na 400km [ps/√km]	< 32	< 8	< 2	< 0,5	< 0,125

Tab. 4.2: Limity PMD dle [22]

5 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ OPTICKÝCH VLÁKEN

Měření různých vlastností optický vláken je důležitou činností nejen při výstavbě optických tras, ale i k průběžnému získávání informací o trasách, které jsou již v provozu. Je totiž důležité, aby vlákna pro různé účely splňovala určitá kritéria.

5.1 Metody měření disperzí

5.1.1 Měření chromatické disperze

Přestože velikost chromatické disperze se dá poměrně snadno a přesně vypočítat a nemění se (viz. kap. 4), v poslední době stále stoupá poptávka po jejím měření. Důvodů je hned několik. S nástupem vysokých rychlostí (10Gb/s a více) se stává CD stále větším problémem, omezujícím dosah. A právě velmi přesné měření je zapotřebí pro kvalitní kompenzaci CD. Dalším důvodem je nástup DWDM na trasách, kde je potřeba zvýšení přenosové kapacity. Zde je tedy nutnost proměřit širokospektrální oblast, kvůli použitelnosti stávajících vláken. V neposlední řadě může měření ulehčit práci při určování CD na trasách složených z úseků několika provozovatelů s vlákny od různých výrobců. [24]

a) Metoda fázového posuvu a diferenciálního fázového posuvu

Dle ITU-T G.650 se jedná o referenční metodu měření CD. Princip metody fázového posuvu ukazuje Obr. 5.1.



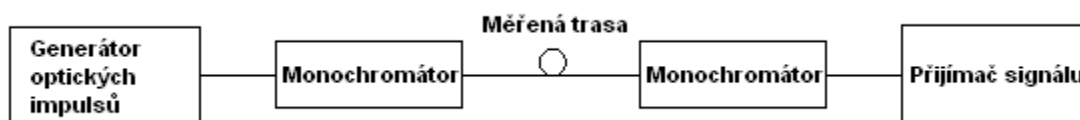
Obr. 5.1: Metoda fázového posuvu [2]

Pro měření se využívá modulovaný zdroj záření o několika vlnových délkách (například LED). Velikost CD je určena na základě změny fáze signálu. Tato změna je stanovena z rozdílu výstupní změřené fáze signálu na konci a vstupní fáze signálu. Nevýhodou je nutnost použít referenční trasy pro přenos informací o vstupní fázi signálu.

V praxi se spíše setkáváme s metodou diferenciálního fázového posuvu. Měří se fázový rozdíl signálů o různých vlnových délkách, odpadá tak nutnost použití referenční trasy. Často je však druhé vlákno stejně používáno pro ovládání vysílače. [2], [17]

b) Metoda zpožděných impulzů v časové oblasti

Zde se CD zjišťuje za pomoci rozdílu mezi rozestupy vstupních a výstupních impulzů. Tyto impulzy jsou vysílány na různých vlnových délkách s přesnou velikostí a rozestupy. Na základě porovnání je pak možné určit jejich zpoždění. Není potřeba používat referenční trasu, protože rozestupy vysílaných impulzů jsou známy. Princip této metody je zobrazen na Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Metoda zpožděných impulzů [2]

Jako generátor impulzů se používá širokospektrální zdroj (např. LED dioda), monochromátorem je kaskáda Braggových mřížek. [2]

c) Interferometrická metoda

Metoda využívá Michelsonův nebo Mach-Zehnderův interferometr. Fázový rozdíl se zde zjišťuje na základě interference mezi signálem z referenčního a měřeného vlákna (se známou hodnotou CD). Není vhodná pro měření dlouhých tras, spíše se užívá v laboratořích. [17]

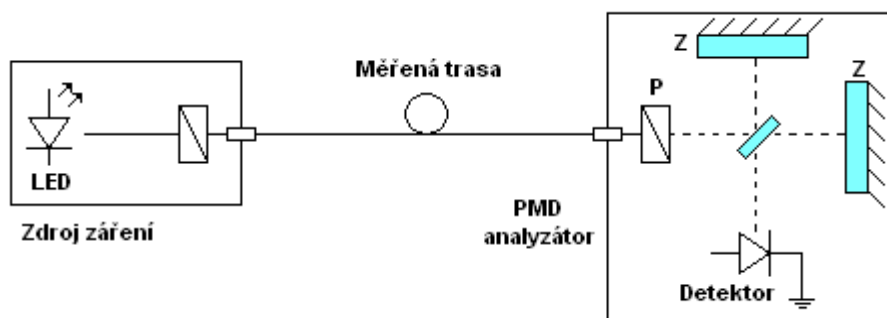
5.1.2 Měření polarizační vidové disperze

Provádí se hlavně z důvodu proměnlivosti PMD. Dalším důvodem je fakt, že výrobci vláken dnes garantují maximální hodnoty PMD, proto je potřeba proměřením zjišťovat, jestli vlákna splňují předepsané limity. [17]

a) Tradiční interferometrická metoda (TINTY)

Jedná se o metodu nejpoužívanější zhruba do roku 2002, zejména kvůli rychlosti a jednoduchosti měření a snadnému použití v terénu. Nemusíme navíc stanovovat referenční hodnotu.

Jejím základem je interference nízkokoherentního záření (zpravidla LED dioda). Na výstupu je pak zapojen PMD analyzátor (interferometr). Interferometr dělí záření do dvou větví (pomocí pevného a pohyblivého zrcadla). Za pomoci pohyblivého zrcadla se mění fázový posun mezi oběma signály, které se odráží zpět k detektoru, kde díky interferenci vytvoří interferogram. Na základě tohoto interferogramu se stanoví zpoždění vlivem PMD. Blokové schéma metody je zobrazeno na Obr. 5.3.

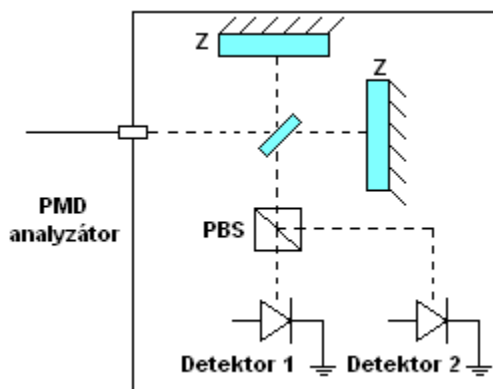


Obr. 5.3: Tradiční interferometrická metoda (TINTY) [25]

Metoda má však určitá omezení, způsobená autokorelační špičkou měřícího signálu. Tato vlastnost ovlivňuje přesnost měření a omezuje měření nízkých hodnot PMD. Metoda je také nepoužitelná pro měření celkové PMD tras s EDFA zesilovači nebo dalšími prvky. V takových případech je nutné měřit každý úsek zvlášť a celkovou hodnotu PMD poté vypočítat. [2], [25]

b) Obecná interferometrická metoda (GINTY)

Tato metoda je používána v současnosti a je zdokonalením předchozí metody TINTY. Byla použita i při měření pro Masarykovu univerzitu (viz kapitola 8). Vylepšení spočívá v potlačení vlivu autokorelační špičky. Schéma této metody uvádí Obr. 5.4.

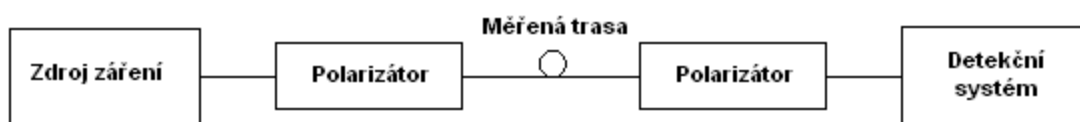


Obr. 5.4: Obecná interferometrická metoda (GINTY) [25]

Jak je vidět, interferovaný signál z obou ramen je dále rozdělen polarizačním děličem. Vzniklé polarizované složky jsou na sebe kolmé a každá z nich dopadá na vlastní detektor. Na obou detektorech dochází k interferenci a dostáváme tak 2 interferogramy. Jejich sečtením pak můžeme získat čistou autokorelaci, odečtením vzájemnou korelaci. Díky tomuto vylepšení je tedy možné měřit nízké hodnoty PMD a celkové optické trasy i s EDFA zesilovači a dalšími optickými prvky. [2], [25]

c) Metoda skenování vlnové délky (metoda s fixním analyzátozem)

Principem je závislost měřeného optického výkonu, který prochází trasou, na vlnové délce. Jako zdroj záření se používá LED dioda nebo laditelný laser. Tato metoda je pomalejší než předchozí dvě. Důvodem je měření ve dvou krocích. Prvním z nich je měření provedené tak, jako ukazuje Obr. 5.5, druhým krokem měříme referenční hodnotu po odstranění polarizátoru před přijímačem. Ke konečnému výpočtu PMD se využívá rychlá Fourierova transformace. [2], [17]



Obr. 5.5: Metoda skenování vlnové délky [2]

d) Metoda polarimetrická

Dle ITU je stanovena jako referenční metoda pro měření PMD. Tento název pod sebe slučuje několik dalších metod, založených na podobném principu:

- metoda analýzy Jonesovy matice
- metoda Poincarého koule
- metoda polarizačních stavů (SOP)

Na rozdíl od předchozích dvou, zde zmíněné metody poskytují komplexní informace o polarizačním stavu na vstupu a výstupu optické trasy.

Polarimetrické metody se vyznačují vysokou přesností - použití pro měření velmi malých hodnot PMD. Tato měření však jsou časově velmi náročná a složitá, a tedy nevhodná do terénu. [17]

e) Metoda POTDR

Hlavní předností této metody je možnost přesné lokalizace úseků se zvýšenou hodnotou PMD. Díky tomu pak není nutná nákladná výměna celé trasy, ale lze

nahradit jen určený úsek. Nepoužitelnost celé trasy totiž může způsobovat i pouze část se zvýšenou hodnotou PMD.

POTDR vychází z principu měření zpětného rozptylu metodou OTDR, reflektograf je však vyhodnocován polarizovaně. Do vlákna je vyslán sled impulzů a ze zpětného rozptylu záření zjišťujeme informace o hodnotách PMD jednotlivých úseků. Pro závislost PMD vlákna trasy můžeme použít zjednodušený vztah

$$\text{PMD} \approx \beta \sqrt{l \cdot h}, \quad (5.1)$$

β - velikost dvojlomu ve vláknu (ps.km^{-1}), l – délka vlákna (km), h – vazební délka, charakterizující vazbu mezi polarizačními vidy (km)

Jak je vidět, PMD roste s růstem všech parametrů ve vztahu.

Pro podélnou analýzu PMD potřebujeme ještě zjistit informace o lokálním dvojlomu a vazební délce. Informace získáváme také ze zpětného rozptylu a existují dvě metody analýzy pro zjišťování těchto údajů. Do vlákna vysíláme krátké polarizované impulzy optického záření. To se provádí u obou metod, rozdíl je však ve způsobu získávání informací ze zpětného rozptylu. [2], [26]

- *Metoda analýzy SOP (metoda skenování vlnové délky)* – při průchodu signálu vláknem dochází ke změně jeho polarizace vlivem dvojlomu a mezividové vazby. To znamená, že tuto změnu lze sledovat na zpětném rozptylu, jinými slovy lze sledovat změnu stavu polarizace SOP (State Of Polarization). Rychlost změny SOP je úměrná velikosti dvojlomu ve vlákne a vazební délce h . Pro požadovaná místa na trase můžeme velikost PMD určit ze spektrální závislosti změn SOP, měříme-li na různých vlnových délkách. Nevýhodou metody je používání velmi krátkých impulzů, což znamená, že je použitelná pouze pro krátké trasy s malou hodnotou PMD. [26]

- *Metoda analýzy DOP* – je na rozdíl od předchozí založena na sledování stupně polarizace DOP (Degree Of Polarization). DOP má hodnotu 1 pro impulz shodně polarizovaný a hodnotu 0 pro impulz zcela depolarizovaný. Zdrojem záření je u této metody úzkospektrální DFB laser. [26]

5.2 Měření útlumu

Měření útlumu optického vlákna je jedním z nejdůležitějších měření. Jedná se o základní parametr, který má značný vliv na přenos signálu optickým vláknem.

Pro určování útlumu se používají tři následující metody:

- *Metoda dvou délek* - jedná se sice o metodu destrukční (vlákno se pro účely měření musí zlomit), je však vysoce citlivá a díky tomu také považována za metodu základní. Dosahuje se přesnosti 0,01 dB/km.

- *Metoda vložného útlumu* - tuto metodu lze použít za provozu pro konektorovaná vlákna, není destrukční. Měření se provádí pomocí optického vysílače a měřiče výkonu. Zde je přesnost závislá na použitém konektoru

- *Metoda zpětného rozptylu* - využívá jiný princip, než předchozí dvě metody. Zde se jedná o časovou závislost zpětného rozptylu optického výkonu. Měření se provádí optickým reflektometrem a poskytuje údaje o celé délce optického vlákna. Je tedy možné zjistit kvalitu vlákna a jeho útlum na konkrétním úseku. [2]

5.3 Měření odrazů (odrazivosti)

Odrazy způsobují problémy ve vysokorychlostních páteřních sítích, ale i v přístupových sítích, především při distribuci televizního signálu pomocí analogové modulace, která je na odrazy citlivá. Toto měření se využívá pro zjišťování informací o bodových nehomogenitách na trase nebo odrazů od součástek na trase. Zjištěné hodnoty vychází záporné. Toto měření je méně časté, více se využívá měření útlumu odrazu. [24]

5.4 Měření útlumu odrazu

Výsledky tohoto měření popisují také odrazy od bodových nehomogenit, jako v předchozím případě. Mimo to je možno měření použít k popisu součtu všech odrazů a zpětného rozptylu na určitém úseku trasy. Zde měříme kladné údaje. Vyšší hodnoty útlumu odrazu znamenají vyšší potlačení odraženého signálu a to značí lepší vlastnosti.

Pro měření se používají tyto metody:

- *OCWR (Optical Continuous Wave Reflectometer)* – je doporučena jako referenční, je přesnější.

- *OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)* – je rychlejší, více přehledná, avšak méně přesná. [24]

6 SNIŽOVÁNÍ VLIVU DISPERZÍ NA PŘENOS

Jak již bylo řečeno dříve, disperzní vlivy jsou nežádoucí vlivy, které způsobují problémy při přenosu optickým vláknem. Proto je věnována značná pozornost vývoji technologií na jejich snižování a potlačování. Existuje řada způsobů jak tyto vlivy omezit a technologie se stále vyvíjí. Mezi možnosti patří ovlivnění vlastností vláken již při výrobním procesu, použitím různých zdrojů záření nebo použití některé z kompenzačních metod. Hlavním cílem kompenzace je zvýšení dosahu přenosových systémů, který právě disperze omezuje.

6.1 Kompenzace chromatické disperze

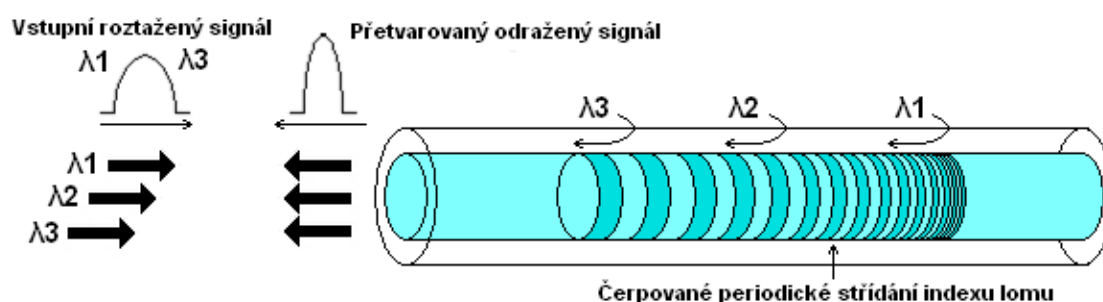
6.1.1 Disperzi kompenzující vlákno (DCF - dispersion compensating fiber)

Jedná se o pasivní metodu kompenzace, která je používána již dlouhou dobu. Provádí se pomocí speciálně navrženého optického vlákna se značnou hodnotou záporné chromatické disperze ($D = -(70-100)\text{ps}/(\text{nm.km})$). DCF způsobuje přesně opačný jev, než nastává na trase u běžného optického vlákna, čímž se vyrovná zpoždění mezi jednotlivými složkami signálu. Toto vlákno se nejčastěji připojuje na začátku optické trasy (pre-kompenzace) nebo na její konec (post-kompenzace). Výsledný kompenzační účinek je prakticky stejný u obou zapojení. Je však možná i kompenzace v průběhu optické trasy. Pro kompenzaci klasického vlákna je třeba použít vlákno DCF o přibližné délce $1/6$ délky celé trasy.

Výhodou DCF vlákna je kontinuální kompenzace přes celé přenosové pásmo C (1530nm – 1565nm). Nevýhodou je značné zvýšení útlumu, které přináší do optické trasy (až 0,5dB/km). Dalším problémem je nedostatečná schopnost kompenzace disperzního sklonu, což komplikuje použití DCF vlákna pro kompenzaci DWDM systémů. Zde je totiž požadována stejná kompenzace pro všechny kanály DWDM. Vlákno je také náchylné na vznik nelineárních jevů, jsou-li do vlákna vysílány velké výkony. Tuto skutečnost způsobuje malá efektivní plocha jádra, která je však potřebná právě pro dosažení uvedených hodnot záporné chromatické disperze. [16], [27]

6.1.2 Čerpovaná Braggova mřížka (FBG - fiber Bragg grating)

Tato kompenzační metoda funguje podobně jako výše uvedené DCF vlákno. Braggova mřížka má proměnnou mřížkovou periodou. Pracuje na principu Braggova reflektoru, který některé vlnové délky propouští a jiné odráží. Tímto způsobem se v krátkém upraveném vlákně některé části spektra odráží dříve, než jiné a tím dochází k časové kompresi pulsu a kompenzaci CD. To také znamená, že odražené spektrum je užší, než vstupní. Za pomoci FBG lze například zvětšit dosah 10Gb/s systému až na 270km. Princip je zobrazen na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Princip funkce čerpované Braggovy mřížky [2]

Nevýhodou je použitelnost mřížky jen pro úzkou spektrální oblast (přibližně do 6nm). Pro širokospektrální použití (více kanálů u DWDM) je tedy nutno použít několik těchto mřížek. Naopak výhodou oproti DCF vláknu je snadnější kompenzace disperzního sklonu, což je vlastnost výhodná pro kompenzaci DWDM systémů. Tato metoda se také vyznačuje menším útlumem, než DCF vlákno, ten nepřesahuje 3dB. Stejně jako u DCF je možno zapojit kompenzátor na oba konce trasy, avšak ani v tomto případě nejsou rozdíly výrazně znatelné. [16], [27], [28]

6.1.3 Optická fázová konjugace (OPC - optical phase conjugator)

U této metody je používán přístroj nazývaný optický fázový konjugátor. Toto zařízení je umístěno uprostřed trasy linky a převrací spektrum. Dlouhé vlnové délky tedy mění na krátké a naopak. Po převrácení spektra pracuje druhá polovina linky v opačném směru.

Ve spojení s vhodným disperzním mapováním je metoda použitelná i k potlačování nelineárních jevů. Pomocí OPC se současně řeší širokopásmová kompenzace zbytkové disperze a nelineární jevy na trasách s vlákny, které kompenzují disperzní sklon. Když je vyrovnán disperzní sklon přenosového vlákna a vlákna kompenzujícího disperzní sklon, je kompenzována zbytková disperze a sklon

disperzního sklonu. Technologie umožňuje zvětšit dosah u systémů 40Gb/s až na cca 180km. [28], [29]

6.1.4 Záporné disperzní vlákno (NDF - negative dispersion fiber)

Toto vlákno bylo nejprve používáno jako přenosové v digitálních optických sítích. Po úpravách je vlákno se zápornou disperzí schopné kompenzovat kladný rozkmit laseru.

Vlákno je používáno pro metropolitní a přístupové sítě pracující se systémy CWDM (Coarse Wavelegth Division Multiplexing – cenově výhodnější náhrada DWDM s většími rozestupy mezi kanály) a DWDM s přímo modulovanými kanály.

Umožňuje bezchybný přenos rychlostmi 2,5Gb/s na vzdálenost 125km (CWDM), 10Gb/s na vzdálenost 320km (DWDM) a 40Gb/s na vzdálenost více, než 40km, a to bez nutnosti dalších kompenzačních technologií. [28], [30]

6.1.5 Reverzní disperzní vlákno (RDF - reverse dispersion fiber)

Toto vlákno se sníženým profilem indexu lomu jádra má oproti vláknu DCF několik výhod. Patří mezi ně nižší útlum, nižší projevy nelineárních jevů a také nižší PMD. Útlum na vlnové délce 1550nm má hodnotu pouhých 0,224dB/km. Disperze vlákna dosahuje -19,65ps/(nm.km) a disperzní sklon -0,132ps/(nm².km).

RDF vlákno se používá pro disperzně řízené páry. Toto hybridní řešení sestává právě z RDF vlákna a z vlákna NZ-DSF s velmi velkou efektivní plochou jádra (ULAF – Ultra Large Effective Core-Area). Vyznačují se disperzí nepřesahující 0,2ps/(nm.km) a nízkým disperzním sklonem v rozmezí vlnových délek 1530nm – 1625nm, který není větší než 0,006 ps/(nm².km).

Díky uvedeným vlastnostem je tato technologie (obsahující RDF vlákno) vhodná pro nasazení do vysokorychlostních a vysokokapacitních systémů WDM. Stejně jako v předchozím případě není nutná žádná další kompenzační metoda. [28], [31]

6.2 Kompenzace polarizační vidové disperze

Snižování vlivu PMD je mnohem větší problém než v případě chromatické disperze. Příčinou jsou důvody, které byly již dříve zmíněny - náhodnost a proměnlivost PMD (viz. kap. 4.2.3), nelze tedy použít statické metody jako u

kompenzace CD. Řešení musí být dynamické, což znamená, že přístroje pro kompenzaci PMD jsou velmi drahé, taktéž i některé další způsoby řešení. Náhodný charakter také neumožňuje přesný výpočet, jako tomu bylo u CD. Protože nelze zcela odstranit vliv PMD, mluvíme zde spíše o zmírnění vlivu než o kompenzaci.

6.2.1 Kompenzátory PMD

Technologie pro kompenzaci PMD můžeme rozdělit na:

a) adaptivní elektrickou kompenzací PMD

- je založená na adaptivních analogových filtrech. Přijatý optický signál je na fotodiodě převeden na signál elektrický. Následuje kompenzace v rámci elektrického signálu. Elektrické kompenzátory PMD jsou realizovány integrovanými obvody. Jsou snadno včlenitelné do přijímače a jejich cena je relativně nízká. Problémem jsou ale větší přenosové rychlosti (více než 10Gb/s), jejichž zpracování překračuje rychlostní limity současné elektroniky. [32]

b) adaptivní optickou kompenzací PMD

- zde se pracuje se samotným optickým signálem. Jednoduchý kompenzátor se skládá z části dvou DOF (Degree Of Freedom) - laditelné parametry kompenzátoru používané pro přizpůsobení a kousku vlákna udržujícího polarizaci (PMF – Polarization Maintaining Fiber), které poskytuje diferenciální skupinové zpoždění DGD (Differential Group Delay) pro kompenzaci trasy. S fixním zpožďovacím prvkem však není možné úplně kompenzovat DGD, které není rovno DGD kompenzátoru.

Dvoustupňový kompenzátor je založený na seskupení dvou PMF a dvou kontrolerů polarizace. Základní princip je podobný jednoduchému kompenzátoru PMD. Díky kontroleru polarizace mezi dvěma PMF může být pro kompenzaci použito laditelné DGD.

Pro adaptaci optických PMD kompenzátorů je obvykle používána zpětná vazba. Významnou zpětnou vazbou u optických kompenzátorů je stupeň polarizace (DOP), protože není závislý na přenosové rychlosti.

Optické kompenzátory PMD jsou realizovány jako vláknové korektory nebo jako planární obvod (PLC - Planar Lightwave Circuit). Tato zařízení jsou také větší a dražší. Jsou však zatím jediným řešením pro přenosové rychlosti nad 10Gb/s. [32]

Další možností je dělení podle umístění kompenzátoru na:

a) kompenzátor před vláknem

- kompenzátor je umístěn na začátku optické trasy, bod sledující změny PMD zůstává na konci trasy a opět posílá pomocí zpětné vazby informace do kompenzátoru. Ten za pomoci přijatých údajů vysílaný signál zdeformuje opačně proti účinkům PMD a signál se pak po průchodu trasou upraví do původního stavu vlivem PMD. [32]

b) kompenzátor za vláknem

- kompenzátor je umístěn až na konci optické trasy, za ním je bod sledující změny PMD, který pomocí zpětné vazby posílá do kompenzátoru údaje o potřebných nastaveních k úpravě přijatého signálu. [32]

Obě metody jsou srovnatelné a jako výhodné řešení se jeví kombinace obou.

6.2.2 Použití jiné vlnové délky

Toto řešení je používáno, nevyhovuje-li trasa pro určitou vlnovou délku. Zkouší se jiný frekvenční rozsah. Jde o řešení jednoduché, realizace je však složitější, protože znamená výměnu aktivních prvků (zdrojů a detektorů) a účinnost není příliš velká. [33]

6.2.3 Použití jiného vlákna optického kabelu

Zde se jedná o využití jiných vláken v optickém kabelu. Většina kabelů je tvořena více vlákny, z nichž některé jsou rezervní, nebo jsou použity pro přenos režijních a servisních informací. Pokud se zjistí, že tato vlákna mají nižší hodnoty PMD, jsou využita pro nejdůležitější přenosové cesty. Spolu s předchozí metodou se jedná o nejlevnější řešení. [33]

6.2.4 Výměna celé optické trasy

Toto řešení bývá velmi nákladné a využívá se v nejhorších případech. Výměna se provádí zpravidla u starších optických tras (vyrobené v 90. letech) a pokud jsou vlákna v kabelu poškozena. Levnější bývá výměna na trasách, kde je možnost zafouknutí kabelů. [33]

6.2.5 Výměna úseku vlákna

Pro tuto metodu je důležité mít údaje o PMD na celé trase optického vlákna. Tyto údaje se získávají pomocí přístroje POTDR. Vzhledem k tomu, že proměřování optických tras se dnes prakticky stalo standardem a hlavně o nově pokládaných trasách jsou k dispozici podrobné údaje, není problémem zjistit úseky s nevyhovující hodnotou PMD a tyto konkrétní části vyměnit za kvalitnější vlákno splňující dané požadavky. [33]

7 SIMULACE OPTICKÉ TRASY A JEJÍ KOMPENZACE

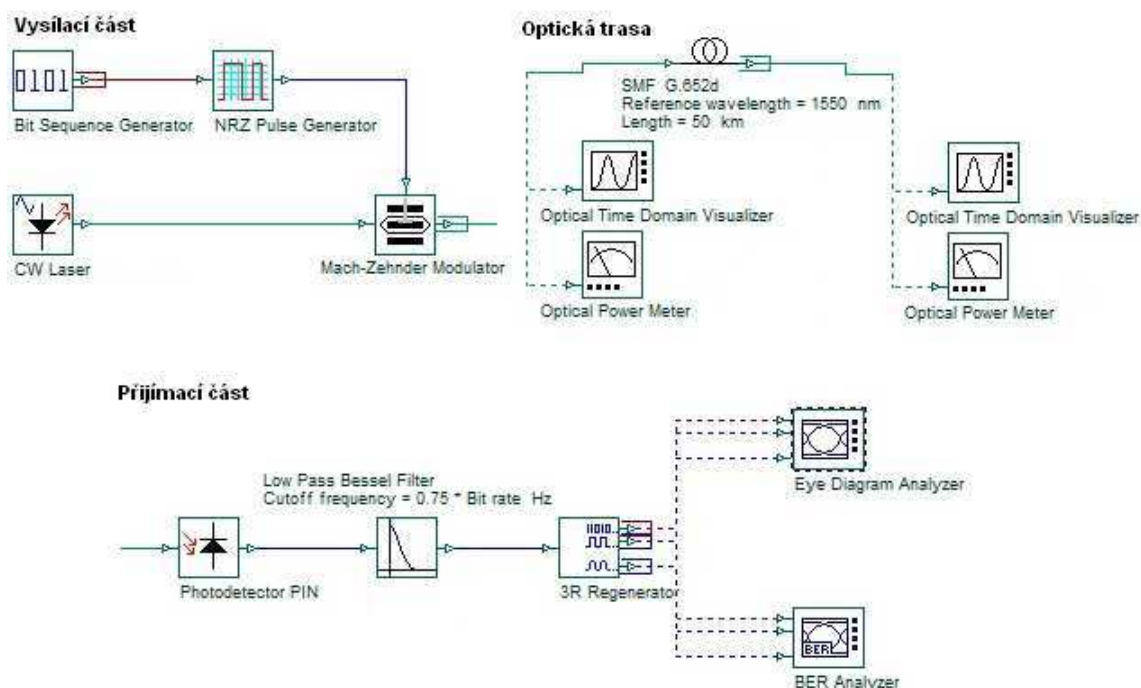
Simulace byly prováděny programem OptiSystem od firmy Optiwave. Jedná se o komplexní softwarový balík, umožňující návrh, testování a simulace přenosu v moderních optických sítích.

7.1 Volba optické trasy a přenosové rychlosti

Pro testování byla zvolena trasa o délce 50km. Dvěma hlavními důvody pro výběr takto dlouhé trasy byly tyto:

- nebylo třeba použít zesilovače EDFA
- hodnota polarizační vidové disperze nepřekročila u žádného měření toleranční hodnoty, takže bylo možno se zabývat pouze kompenzací chromatické disperze.

Trasa použitá pro měření v programu Optisystem je zobrazena na Obr. 7.1. Pro získávání potřebných parametrů trasy byly použity bloky: Optical Time Domain Visualiser (zobrazení časového průběhu signálu), Eye Diagram Analyser (zobrazení diagramu oka) a Optical Power Meter (měřidlo výkonu).



Obr. 7.1: Zapojení simulované optické trasy

Tabulka 7.1 dále uvádí nastavení parametrů generátoru impulzů, laseru a optického vlákna.

Prvek	Parametr	Hodnota
CW Laser	Vlnová délka	1550nm
	Výkon	0dBm
Bit Sequence Generator	Přenosová rychlost	2,5Gb/s, 10Gb/s, 40Gb/s
	Vysílaná bitová sekvence	1 0 1 0 1
SMF G.652d	Vlnová délka	1550nm
	Délka vlákna	50km
	Koeficient CD	16,75ps/(nm.km)
	Disperzní sklon	0,075ps/(nm ² .km)
	Koeficient PMD	0,5ps/ \sqrt{km}

Tab. 7.1: Nastavení parametrů prvků použitého přenosového systému

Na zvolené trase byly dále testovány bez kompenzace tři zvolené přenosové rychlosti, které jsou v současné době nejpoužívanější – 2,5Gb/s, 10Gb/s, 40Gb/s. Byla kontrolována chybovost a útlum na konci trasy pro výběr nejvhodnější přenosové rychlosti k následnému testování kompenzačních metod. Diagramy oka pro jednotlivé měřené rychlosti jsou uvedeny v přílohách. Tolerance chybovosti BER byla zvolena na hodnotu 10^{-5} , kdy je přijímač ještě schopen správně vyhodnotit přijatý signál a z něj úrovně log 0 a log 1. Naměřené hodnoty chybovosti jsou uvedeny v Tab. 7.2.

Přenosová rychlost	BER	Útlum
2,5Gb/s	$\cong 10^{-63}$	10dB
10Gb/s	$\cong 10^{-52}$	
40Gb/s	1	

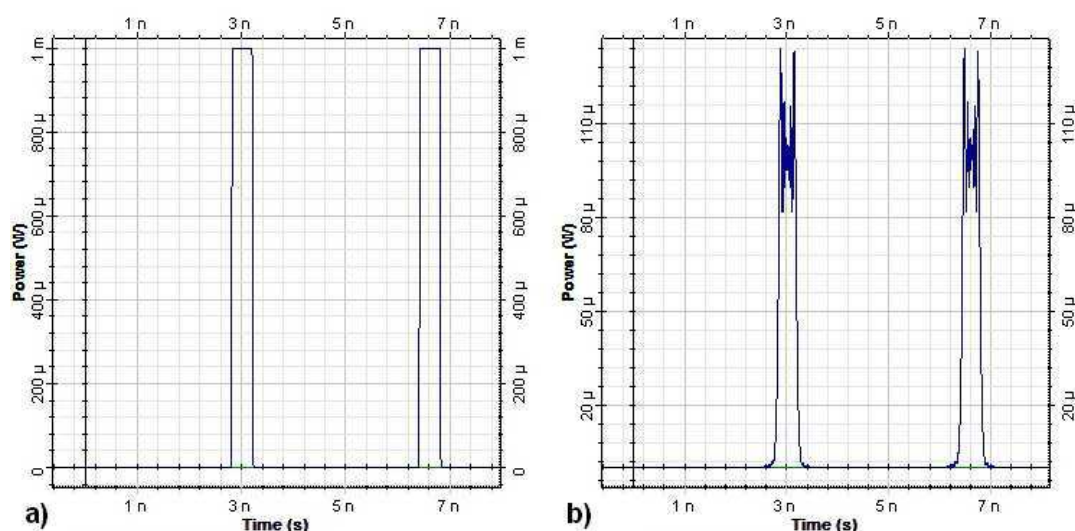
Tab. 7.2: Naměřené hodnoty chybovosti BER pro různé přenosové rychlosti

Pro přenosovou rychlost 2,5Gb/s byla chybovost $\cong 10^{-63}$, pro rychlost 10Gb/s to byla hodnota $\cong 10^{-52}$, přenos tedy fungoval u obou rychlostí bezchybně (tomu odpovídají diagramy oka v příloze č. 1 a č. 2). Při vyšší rychlosti (40Gb/s) byla chybovost 1, nebylo již možné rozeznat binární hodnoty 1 a 0 (diagram oka v příloze č. 3).

Následně byla v generátoru nastavena nejprve posloupnost 0 0 0 0 1 0 0 0 0. Tato posloupnost slouží pro názorné zobrazení zkreslení přenášeného signálu na konci trasy pro jednotlivé zvolené přenosové rychlosti za použití bloku Optical Time Domain Visualizer (Obr. 7.2, 7.3, 7.4). Popis je uveden v dalším textu. Pro hodnocení chybovosti a diagramu oka pro všechny testované rychlosti v následujících podkapitolách byla poté použita posloupnost 1 0 1 0 1.

7.1.1 Vliv disperze na přenášený signál rychlostí 2,5Gb/s

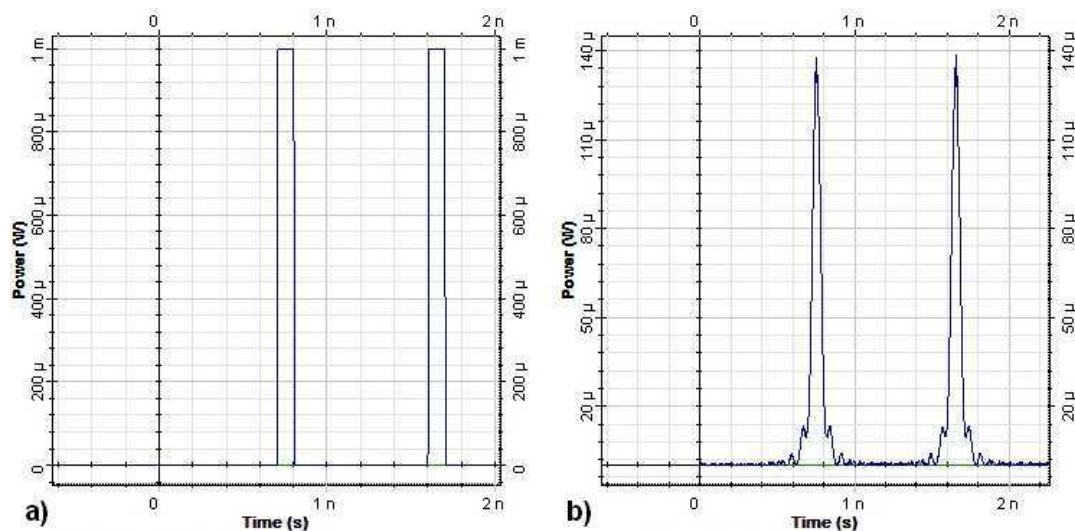
Při rychlosti 2,5GB/s je přenesený signál na výstupu trasy stále dostatečně kvalitní, jak ukazuje porovnání vstupního (Obr. 7.2(a)) a výstupního (Obr. 7.2(b)) bitu a také zjištěná chybovost (viz. Tab. 7.1). Diagram oka pro tuto přenosovou rychlost je uveden v příloze č. 1. Pro přijímač nebude tedy problém z přijatého signálu jednoznačně rozeznat úrovně log 0 a log 1. Proto nebudeme dále tuto přenosovou rychlost uvažovat pro testování kompenzačních metod.



Obr. 7.2: Vstupní (a) a výstupní (b) časový průběh jednoho bitu pro rychlost 2.5Gb/s

7.1.2 Vliv disperze na přenášený signál rychlostí 10Gb/s

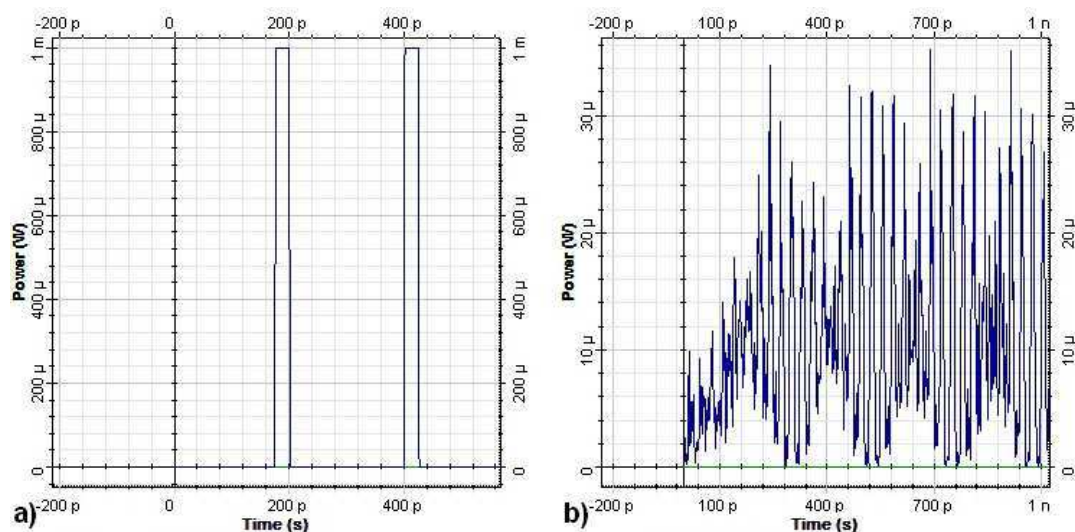
U této rychlosti byl signál na výstupu více zkreslený oproti předchozímu měření, nicméně i v tomto případě byl výsledek dostačující, aby přijímač bez problémů rozpoznal logické úrovně. Taktéž zjištěná chybovost byla stále na velmi nízké úrovni (viz Tab. 7.2). Na Obr. 7.3 je opět časový průběh vstupního (a) a výstupního (b) bitu, diagram oka je uveden v příloze č. 2.



Obr. 7.3: Vstupní (a) a výstupní (b) časový průběh jednoho bitu pro rychlost 10Gb/s

7.1.3 Vliv disperze na přenášený signál rychlostí 40Gb/s

V případě rychlosti 40Gb/s již byl vliv chromatické disperze velmi znatelný. Signál na konci trasy byl již natolik zkreslený, že by přijímač nebyl schopný logické úrovně rozpoznat. Projevuje se zde také vliv mezisymbolové interference. Chybovost dosáhla tak vysoké hodnoty, že vzrostla na hodnotu 1 (viz Tab. 7.2). Diagram oka uvádí příloha č. 3. Z těchto výsledků je očividné, že trasu o délce 50km pro přenosovou rychlost 40Gb/s je již nutné kompenzovat.



Obr. 7.4: Vstupní (a) a výstupní (b) časový průběh jednoho bitu pro rychlost 40Gb/s

7.2 Kompenzace chromatické disperze optické trasy

Pro kompenzaci chromatické disperze zvolené trasy s přenosovou rychlostí 40Gb/s byly zvoleny dvě výše popsané metody – disperzi kompenzující vlákno (DCF) a čerpovaná Braggova mřížka (FBG).

Pro zhodnocení kvality přenášeného signálu po kompenzaci byla sledována výsledná chybovost a diagram oka. Rozevření diagramu oka ve směru osy y značí vzdálenost mezi logickými úrovněmi log 0 a log 1. Čím je vzdálenost mezi krajními polohami větší, tím menší je pravděpodobnost záměny logických úrovní. Vzdálenost mezi krajními polohami diagramu oka ve směru osy x zase značí rozhodovací čas o dané úrovni, i zde tedy platí, že větší šířka je pro přijímač lepší. Diagram umožňuje vyhodnotit i další parametry, např. mezisymbolovou interferenci, jitter (kolísání zpoždění) a další. [34]

7.2.1 Kompenzace pomocí metody DCF

Jak bylo zmíněno dříve (viz kap. 6), pro kompenzaci trasy metodou DCF potřebujeme kompenzační vlákno dlouhé přibližně 1/6 délky celé trasy. Přesněji můžeme vypočítat potřebnou délku pomocí vztahu 7.1.

$$l_{DCF} = \frac{CD}{D_{DCF}} \quad (\text{km}) \quad (7.1)$$

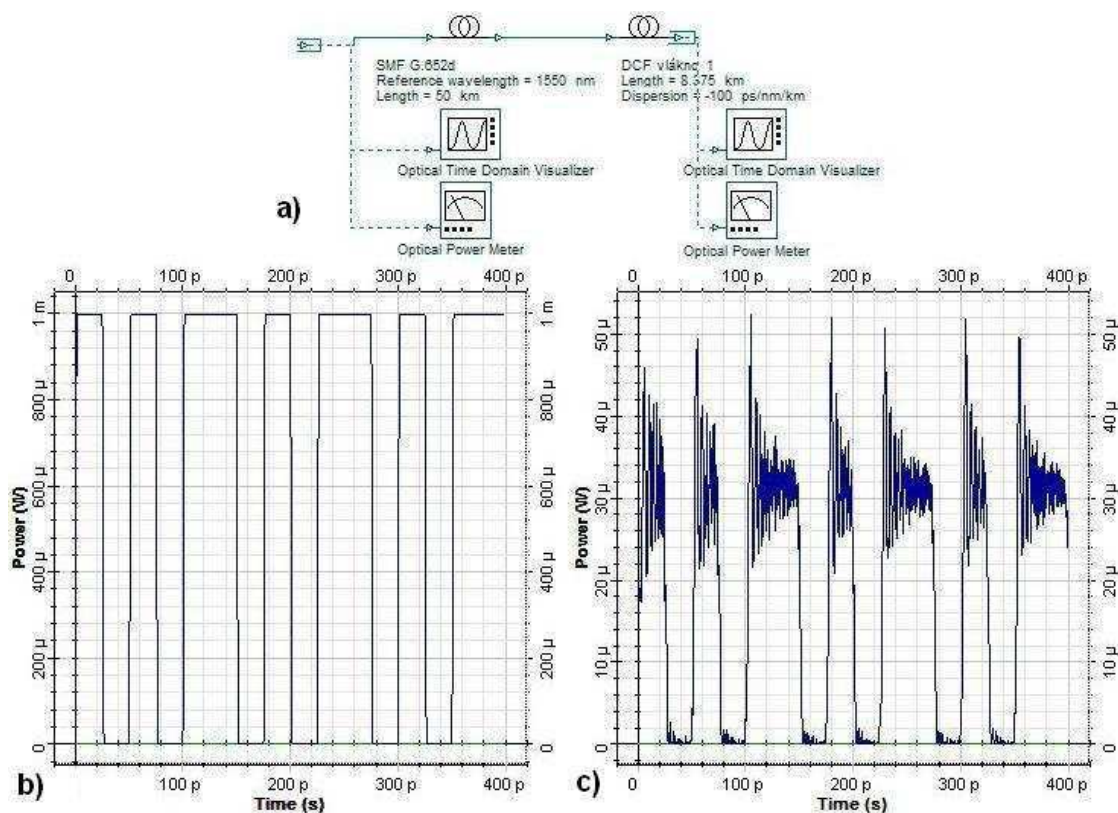
l_{DCF} – délka kompenzačního vlákna (km), CD – celková chromatická disperze kompenzované trasy (ps/nm), D_{DCF} – koeficient CD vlákna DCF (ps/(nm.km))

Pro měřenou trasu o délce 50km musíme tedy použít 8,375km kompenzačního vlákna. Stránky internetového obchodu [36] uvádí cenu \$2 za 1m DCF vlákna od firmy Lucent. Pro naše potřeby je to tedy celkově \$16750 (při současném kurzu cca 350tis. Kč). Na Obr. 7.5(a) je zobrazeno zapojení kompenzačního vlákna a také porovnání časového průběhu testovací sekvence na vstupu (Obr. 7.5(b)) a výstupu (Obr. 7.5(c)).

V Tab. 7.3 jsou uvedeny parametry použitého DCF vlákna, celkový útlum trasy s DCF vláknem a také výsledná chybovost BER na konci trasy po vykompenzování.

Prvek	Parametr	Hodnota
DCF vlákno	Vlnová délka	1550nm
	Délka vlákna	8,375km
	Útlum	0,6dB/km
	Koeficient CD	-100ps/(nm.km)
	Disperzní sklon	0,21ps/(nm ² .km)
Naměřená chybovost BER: $\cong 10^{-24}$		
Celkový útlum trasy: 15,025dB		

Tab. 7.3: Parametry použitého DCF vlákna



Obr. 7.5: Zapojení kompenzačního vlákna do trasy (a); vstupní (b) a kompenzovaný (c) časový průběh bitové sekvence

Jak je vidět z výsledků chybovosti a tvaru výstupních bitů po kompenzaci, přenesený signál bude dostatečně kvalitní, aby jej přijímač mohl bez problémů zpracovat, a to i přesto, že mají kompenzační vlákna poměrně velký vložný útlum (v našem případě hodnota 0,6dB/km). Kvalitu lze hodnotit i z diagramu oka (viz příloha č. 4), kde je vidět lehké zkreslení, ale dostatečné rozevření pro rozeznání úrovní a dostatečný rozhodovací čas. Kompenzační vlákno přidává do trasy velký celkový vložný útlum (přibližně 5dB), který by se s rostoucí délkou DCF

vlákna dále zvyšoval. Tento fakt potvrzuje dříve zmíněné informace o nevýhodách kompenzačního vlákna (viz kap. 6).

Pro zajímavost bylo zjišťováno, jaká maximální délka trasy bez zesilovače s kompenzací pomocí DCF je reálná. Zvolená kritéria chybovosti (naměřená hodnota byla řádově 10^{-5}) ještě splňovala trasa o délce cca 62km, nicméně přijímač už by mohl mít problémy s příjmem (diagram oka viz příloha č. 6).

7.2.2 Kompenzace pomocí metody FBG

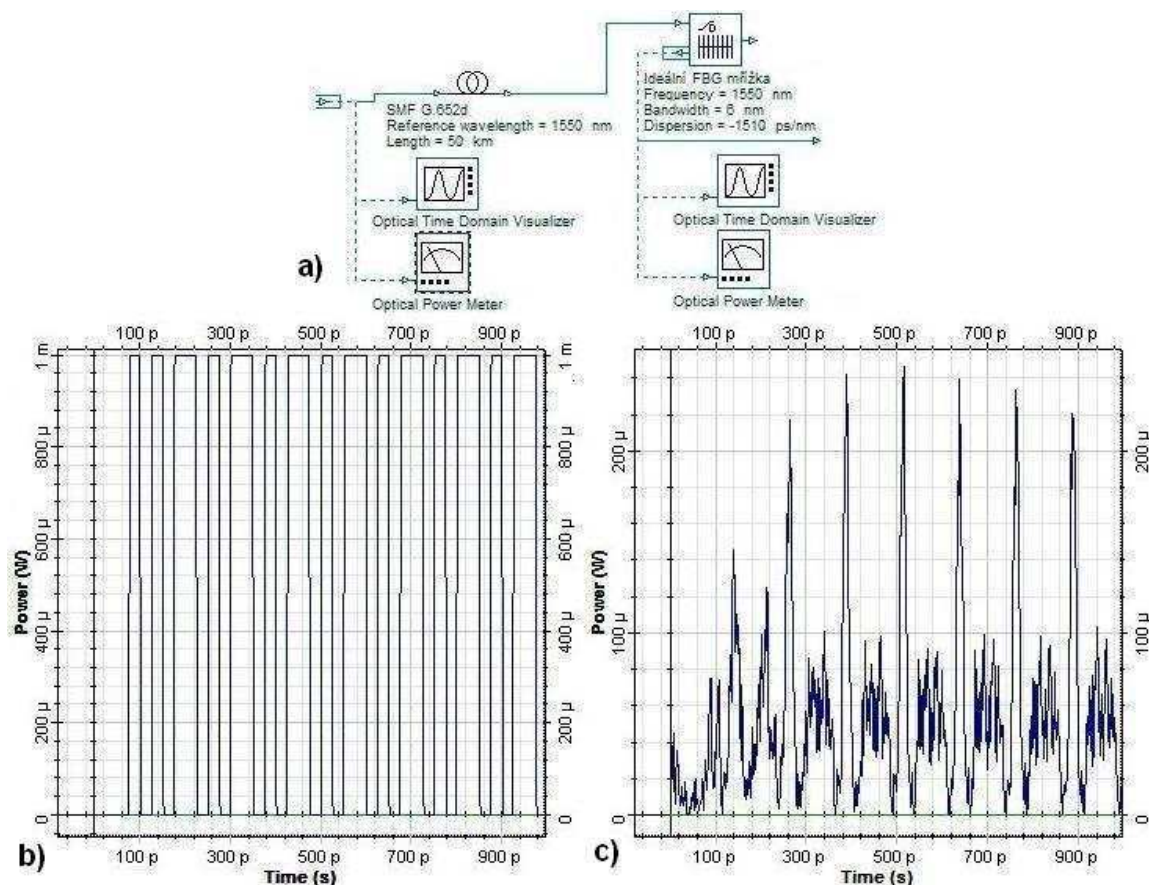
FBG mřížky jsou k dispozici ve formě modulů. Výhody této metody byly zmíněny již v kapitole 6. U nás poskytuje tyto moduly např. firma Safibra, s.r.o. V nabídce jsou fixní, laditelné a kontinuální kompenzátory chromatické disperze i pro širokopásmové využití v systémech DWDM. V současné době poskytují zařízení od firmy Proximion, jejichž řešení umožňuje kompenzovat chromatickou disperzi kontinuálně v celém frekvenčním pásmu C (1530nm – 1565nm), čímž se vlastnosti přibližují standardním kompenzačním vláknům, zachovávají však pozitivní vlastnosti FGB mřížek. Některé moduly umožňují kompenzaci i tras o délce několika stovek kilometrů. Firma Safibra, s.r.o. poskytla informaci, že ceny kontinuálních DCM modulů pro testovanou přenosovou rychlost 40Gb/s se pohybují kolem 4400EUR (při současném kurzu cca 110tis. Kč). [35]

Na Obr. 7.6(a) je schéma zapojení FGB mřížky do optické trasy a opět porovnání časového průběhu testovací sekvence na vstupu 7.6(b) a výstupu 7.6(c).

Pro kompenzaci touto metodou byla zvolena ideální Braggova mřížka. Natavení tohoto prvku, vykazující nejnížší výslednou chybovost a celkový útlum trasy s kompenzátozem uvádí Tab. 7.4.

Prvek	Parametr	Hodnota
Ideální FBG mřížka	Vlnová délka	1550nm
	Šířka pásma	2nm
	Hodnota disperze	-1510ps/nm
Naměřená chybovost BER: $\cong 10^{-22}$		
Celkový útlum trasy: 13,064dB		

Tab. 7.4: Parametry použité FBG mřížky



Obr. 7.6: Zapojení FBG mřížky do trasy (a); vstupní (b) a kompenzovaný (c) časový průběh bitové sekvence

Výsledky ukazují, že i zde je chybovost dostatečně nízká. Diagram oka (viz příloha č. 7) je však o poznání více zkreslený než v předchozí metodě, čímž by mohla být snížena rozhodovací schopnost přijímače. Kvalitní přijímač by však měl být schopen tento signál zpracovat. V tomto případě FBG mřížka do trasy přispívá útlumem přibližně 3dB, tato hodnota je však stabilní oproti metodě využívající kompenzačního vlákna, kde útlum roste s rostoucí délkou trasy, a tím pádem s rostoucí délkou kompenzačního vlákna.

I u této metody byla testována maximální možná délka kompenzované trasy bez zesilovače s daným nastavením kompenzačního prvku. Jako použitelná vycházela ještě trasa o délce cca 57km (chybovost byla opět řádově 10^{-5} , diagram oka viz příloha č. 7).

8 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

Měření bylo prováděno na univerzitní síti Masarykovy univerzity. Pro náměry CD a PMD reflektometrickou metodou byl použit přístroj EXFO FTB-200 s modulem FTB-5700. CD byla dále měřena metodou fázového posuvu přístrojem EXFO FTB-400 s modulem FTB-5800. K vyhodnocení měření byl použit program FastReporter, dodávaný k měřidlům.

Jednotlivé trasy byly testovány, jsou-li vhodné pro nasazení vysokorychlostního systému DWDM. Následující výsledky jsou náměrem trasy Botanická – Lipová, kde je zapojeno vlákno G.652 NDSF.

8.1 Měření CD a PMD reflektometrickou metodou

Jak již bylo zmíněno, měření reflektometrickou metodou probíhalo pomocí přístroje EXFO FTB-200 s modulem FTB-5700. Měřicí metoda je založena na analýze náhodně se měnícího stavu polarizace. Tento modul umožňuje na jednom portu měřit CD i PMD.

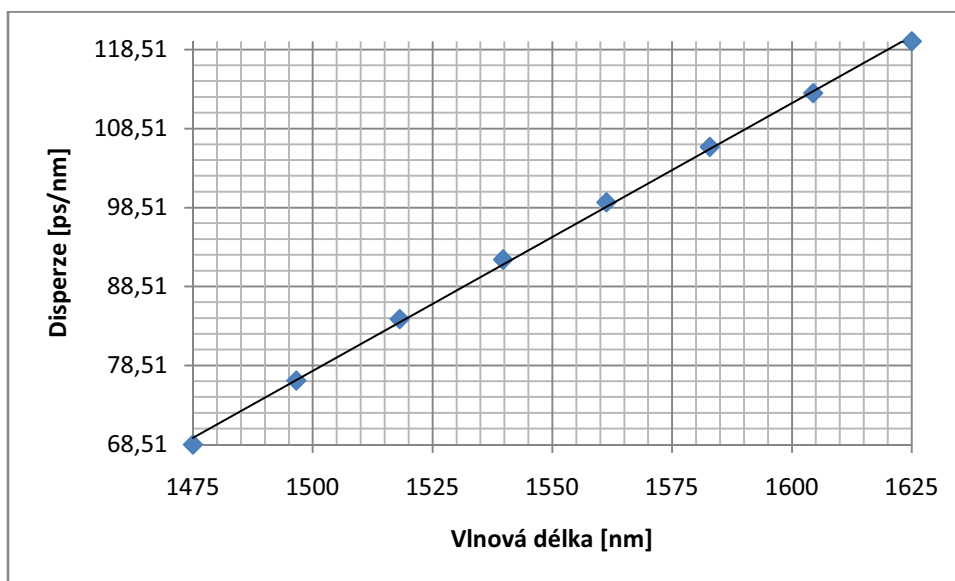
8.1.1 Měření CD

Měření bylo prováděno v rozsahu vlnových délek 1475 – 1626nm. Přístroj určil délku měřené trasy na 5,760km. Pro vlnovou délku 1550nm byla změřena hodnota disperze 95,40ps/nm. Z tohoto údaje jsme jednoduchým vztahem (8.1) určili koeficient CD 15,56ps/(nm.km). Tato hodnota odpovídá použitému typu optického vlákna. Pro vlákno G.652d je doporučena maximální hodnota CD 18ps/(nm.km). V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty.

	Vlnová délka [nm]	Disperze [ps/nm]	Koeficient CD [ps/(nm.km)]
1.	1475,00	68,51	11,89
2.	1496,57	76,60	13,30
3.	1518,14	84,39	14,65
4.	1539,71	91,90	15,96
5.	1561,29	99,17	17,22
6.	1582,86	106,19	18,44
7.	1604,43	112,98	19,62
8.	1625,00	119,57	20,76

Tab. 8.1: Naměřené hodnoty CD reflektometrickou metodou

Na Obr. 8.1 je graf závislosti naměřených hodnot chromatické disperze na vlnové délce.



Obr. 8.1: Závislost CD na vlnové délce

Koeficient chromatické disperze lze spočítat pomocí jednoduchého vztahu:

$$D = \frac{CD}{l}, \quad (\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})) \quad (8.1)$$

kde l je celková délka měřené trasy (km).

Pro přenos rychlostí 10Gb/s je maximální přípustná hodnota disperze 1100ps/nm, naměřená hodnota se pohybovala nanejvýš kolem 120ps/nm, což znamená, že trasa má dostatečné rezervy.

8.1.2 Měření PDM

Metodou reflektometrickou byla změřena na stejné trase také (délka 5,760km) hodnota PMD 0,07ps a koeficient PMD 0,0274ps/ $\sqrt{\text{km}}$.

I v případě PMD vyhovovala měřená trasa předepsané limitní hodnotě. U přenosových rychlostí od 10Gb/s výše nesmí překročit hodnota koeficientu PMD 0,5ps/ $\sqrt{\text{km}}$.

8.2 Měření CD metodou fázového posuvu

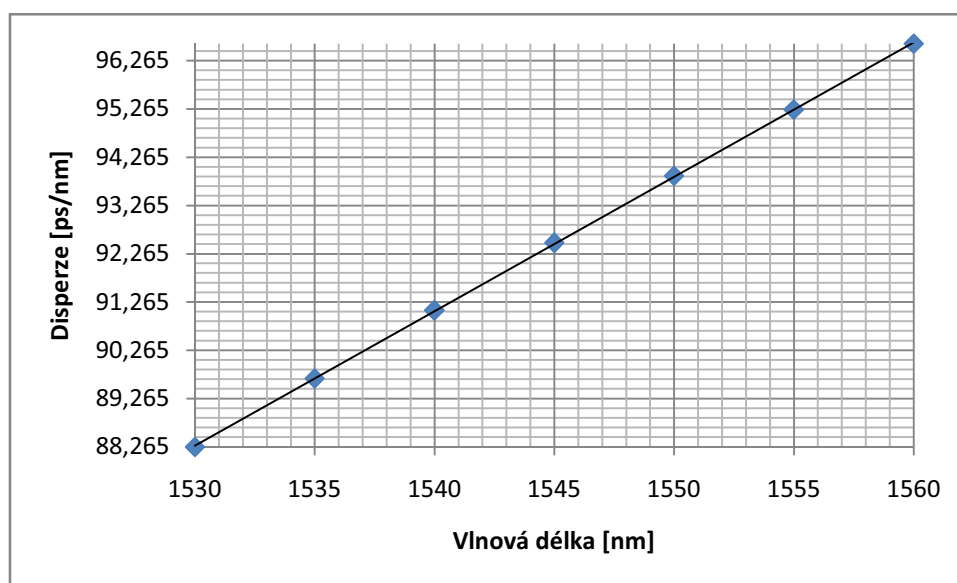
Měření chromatické disperze bylo provedeno také metodou fázového posuvu, která je doporučena jako metoda referenční. Měřeno bylo v rozsahu vlnových délek 1530-1564,90nm. Délka trasy byla přístrojem určena na 7,743km. Pro

vlnovou délku 1550nm byla změřena hodnota disperze 93,877ps/nm a hodnota koeficientu CD 16,346ps/(nm.km). Všechny hodnoty naměřené pro zvolený rozsah s krokem 5nm uvádí Tab. 8.2.

	Vlnová délka [nm]	Disperze [ps/nm]	Koeficient CD [ps/(nm.km)]
1.	1530,00	88,265	15,369
2.	1535,00	89,684	15,616
3.	1540,00	91,092	15,861
4.	1545,00	92,490	16,105
5.	1550,00	93,877	16,346
6.	1555,00	95,253	16,586
7.	1560,00	96,619	16,824

Tab. 8.2: Naměřené hodnoty CD metodou fázového posuvu

Na Obr. 8.2 je graf závislosti naměřených hodnot chromatické disperze na vlnové délce.



Obr. 8.2: Závislost CD na vlnové délce

U této metody jsme neměřili v oblasti celého pásma jako u předchozí metody. Přístroj umožňoval nastavit užší spektrální oblast (pásma C+L). Bylo tedy možné změřit charakteristiku přesněji s menšími rozestupy. Velkou výhodou této metody je také rychlejší proměření jednoho vlákna (doba měření se pohybovala kolem 15s) oproti reflektometrické metodě (kolem 3min).

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce si v první polovině klade za cíl seznámit čtenáře se základními poznatky o optickém přenosu. Následující kapitoly pojednávají o diagnostice v oblasti optických přenosů a následně řešením nejzávažnějších negativních vlivů – chromatické a polarizační vidové disperze. V současné době, kdy je zavádění vysokých přenosových rychlostí (10Gb/s a více) na vzestupu, je měření CD a PMD a jejich následná kompenzace velmi aktuálním problémem. Poslední část práce se věnuje uvedením teoretické části do praxe za použití simulačního prostředí Optisystem a následně i za pomoci výsledků praktického měření optické trasy.

V současnosti jsou nejpoužívanější jednovidová optická vlákna na dlouhé trasy, mnohovidová vlákna se používala více v dřívějších dobách a slouží pro krátké přenosy na cca 100m. Vlákna POF se uplatňují v automobilovém průmyslu a mají budoucnost jako levnější řešení pro lokální sítě na desítky metrů.

Existuje množství typů optických kabelů. Typy pro vnitřní použití mají menší zabezpečení než kabely venkovní. Většinou postačí izolovat vlákna primární a sekundární ochranou. Vlákna bývají obalena kevlarovou výztuží pro lepší tahové vlastnosti. Kabely pro venkovní použití a extrémní podmínky (podmořské) bývají opatřeny pancíře z ocelových drátů, popřípadě další vrstvou měděných drátů proti mechanickému poškození. Pronikání vlhkosti zabraňuje uložení vláken do plastových trubiček vyplněných speciálním gelem.

Na přenos optického signálu působí ztráty absorpcí, materiálový rozptyl a disperze. Ztráty absorpcí jsou dány použitým materiálem a nečistotami v něm. Pod materiálový rozptyl řadíme lineární a nelineární jevy. Lineární jevy jsou způsobeny nečistotami ve vlákně a jeho geometrií. Nelineární jevy se projevují závislostí indexu lomu na výkonu, který vláknem prochází. Je to tedy jev významný pro případy nasazování vlnového multiplexu. Disperzní jevy ovlivňují přenosy na dlouhé vzdálenosti. Způsobují zkreslení signálu, které roste s délkou trasy.

Chromatická disperze se projevuje hlavně v případě hustého vlnového multiplexu. Je způsobena časovým roztažením signálu po průchodu vláknem. Chromatickou disperzi je možno odstranit pomocí kompenzace. Existuje několik kompenzačních metod – DCF, FBG, OPC, NDF, RDF. Polarizační vidová disperze se

zásadně projevuje až u vysokorychlostních přenosů. Způsobuje ji vzájemné zpožďování dvou polarizačních rovin šířícího se vidu a je závislá na měnících se geometrických vlastnostech vlákna. Díky nepředvídatelnosti je její odstranění obtížné. Dynamicky se přizpůsobující kompenzátory PMD jsou drahé a zatím nepříliš dostupné. Jiným řešením je pak pouze použití jiné vlnové délky, jiného vlákna optického kabelu, popřípadě výměna celé trasy nebo jejího úseku.

Referenční metodou měření CD dle ITU-T je metoda fázového posuvu. Měření je rychlé, její nevýhodou je však nutnost použití referenční trasy. Tato nutnost odpadá při použití metody zpožděných impulzů v časové oblasti nebo metody interferometrické. Druhá zmíněná však není vhodná pro dlouhé trasy a měření je pomalejší. Pro měření PMD je jako referenční metoda dle ITU-T stanovena metoda polarimetrická, která je sice velmi přesná, ale měření je zdlouhavé a náročné. V terénu je nejpoužívanější interferometrická metoda GINTY, která oproti starší metodě TINTY odstraňuje nežádoucí vliv autokorelační špičky a umožňuje měření celé trasy i s optickými prvky. Komplexní informace o celém vlákně poskytuje metoda POTDR.

Pro kompenzaci CD se nejčastěji používají metody DCF a FBG. Výhodou DCF je kontinuální kompenzace přes celé přenosové pásmo C, oproti tomu je hlavní nevýhodou velký vložný útlum vlákna. DCF vlákna jsou v poslední době odsouvána FGB mřížkami. Stejně jako u DCF je výhodou FGB kompenzace přes celé pásmo C. Mezi další výhody patří snadnější kompenzace disperzního sklonu, menší rozměry kompenzátorů a jejich přeladitelnost. Nevýhodná je použitelnost pouze pro úzkou spektrální oblast. Dalšími možnostmi kompenzace CD jsou metody OPC, NDF a RDF. OPC se hodí pro potlačování nelineárních jevů, NDF dokáže kompenzovat kladný rozkmit laseru a RDF se vyznačuje nízkým útlumem, nižšími projevy nelineárních jevů a nižší PMD. Kompenzace PMD je obtížná, nicméně již existují adaptivní optické a elektrické technologie pro kompenzaci. Pro 10Gb/s přenosové systémy je vhodnější elektrická kompenzace s ohledem na poměr cena/výkon. U vyšších rychlostí je v současnosti zatím jediným řešením kompenzace optická.

Simulace kompenzačních metod DCF a FGB v první polovině praktické části ukazují, že lepší vlastnosti má kompenzovaný signál po použití metody DCF, dokazuje to porovnání diagramů oka v příloze č. 4 a č. 5. Příjem signálu po

kompenzaci pomocí FGB bude potřebovat kvalitnější přijímač pro bezproblémové rozeznání úrovní log 0 a log 1. Z hlediska použití v praxi však bude výhodnější použití FGB kompenzátoru za cenu pořízení dražšího přijímače. Náklady na kompenzaci stejné trasy pomocí DCF jsou třikrát vyšší než při použití FGB, jak je vidět ze zjištěných informací o cenách metod. Mimo to je výhodou kompenzátorů na bázi FGB použitelnost stejného zařízení i při změnách na trase, a to bez nutnosti dodatečných investic.

Poslední kapitola se zabývá praktickým měření vybrané trasy univerzitní sítě Masarykovy univerzity. Vybranými metodami byla měřena jak polarizační vidová disperze, tak chromatická disperze. Moderní měřicí přístroje mají jednoduché ovládání a měření s nimi je většinou poměrně snadné, jak jsme se přesvědčili u zapůjčených modelů. Měřena byla jak chromatická, tak polarizační vidová disperze metodou reflektometrickou. Chromatická disperze byla následně měřena také metodou fázového posuvu. Tento fakt nám umožnil praktické srovnání dvou měřících metod chromatické disperze, z nichž metoda fázového posuvu poskytuje možnost zvolení užšího měřeného pásma a tím přesnějšího měření. Navíc bylo výhodou rychlejší měření (řádově v desítkách sekund). Měřená trasa splňovala dané limity. Jednalo se však pouze o krátký úsek. Měření CD jsou nutná spíše na delších trasách, kde se mohou vyskytovat vlákna různých výrobců a od různých poskytovatelů, což znesnadňuje výpočet CD.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FILKA, M. *Optické sítě*. Skripta. VUT FEKT, Brno 2003. s. 80-108
- [2] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno : Centa, spol. s.r. o., 2009. 372 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [3] PETERKA, J. *Optická vlákna* [Online]. [cit. 2009-11-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.earchiv.cz/a96/a645k150.php3>>
- [4] PETERKA, J. *Optické kabely* [Online]. [cit. 2009-11-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.earchiv.cz/a92/a208c110.php3>>
- [5] *Technologie přenosu dat přes optická vlákna* [Online]. 2008 [cit. 2009-11-13]. Dostupný z WWW: <http://pctuning.tyden.cz/hardware/site-a-internet/9994-technologie_prenosu_dat_pres_opticka_vlakna>
- [6] KLEGA, V. *Optické sítě* [Online]. 2009 [cit. 2009-11-13]. Dostupný z WWW: <<http://old.chip.cz/cs/clanky/technicky-lexikon/lexikon-opticke-site.html>>
- [7] *Optické kabely SAMSUNG* [online]. Praha. Atlantis datacom spol. s r.o. , 2009 [cit. 2009-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.optickekabely.cz/Kabely.aspx>>
- [8] *Plastic Optical Fiber Trade Organization* [online]. 2009 [cit. 2009-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.pofto.com>>
- [9] *The Fiber Optic Association, Inc.* [online]. 2009 [cit. 2009-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.thefoa.org>>
- [10] PUŽMANOVÁ, R. *Jak zlevnit optickou přípojku* [Online]. 2006 [cit. 2009-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.dsl.cz/clanek/522-jak-zlevnit-optickou-pripojku>>
- [11] KLAŠKA, L. *10 Gb/s po plastovém optickém vlákně* [Online]. 2006 [cit. 2009-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.svetsiti.cz/view.asp?rubrika=Tutorialy&temaID=274&clanekID=314>>
- [12] *ITU-T: G.652 - Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. [online], ITU-T, 2005. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-200506-S>>.

- [13] *ITU-T: G.653 - Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.* [online], ITU-T, 2006. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.653-200612-I>>.
- [14] *ITU-T: G.654 - Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable.* [online], ITU-T, 2006. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.654-200612-I>>.
- [15] *ITU-T: G.655 - Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.* [online], ITU-T, 2006. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.655-200603-S>>.
- [16] HÁJEK, M., HOLOMEČEK, P. *Chromatická disperze jednovidových optických vláken a její měření* [online]. 2002 [cit. 2009-12-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.mikrokom.eu/skoleni/pdf/chrom-disperze.pdf>>.
- [17] HÁJEK, M., HOLOMEČEK, P. *Měření chromatické a polarizační vidové disperze jednovidových optických tras* [online]. 2002 [cit. 2009-12-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.mikrokom.eu/skoleni/pdf/CD-PMDcablex2002.pdf>>.
- [18] HÁJEK, J. *Optická přenosová technika* [online]. [cit. 2009-11-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=3206>>.
- [19] *Fiber Nonlinearities* [Online]. [cit. 2009-11-28]. Dostupný z WWW: <http://www.fiber-optics.info/articles/fiber_nonlinearities>
- [20] *ITU-T: G.657 - Characteristics of a Bending Loss Insensitive Single Mode Optical Fibre and Cable for the Access Network.* [online], ITU-T, 2006. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.657-200612-S>>.
- [21] *ITU-T: G.695 : Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications.* [online], ITU-T, 2006. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.695-200612-S>>.
- [22] *ITU-T: G.697 : Optical monitoring for DWDM systems.* [online], ITU-T, 2006. Dostupné z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.697-200406-S>>.
- [23] ALWAYN, V. *Fiber-Optic Technologies* [Online]. 2004 [cit. 2009-11-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=170740&seqNum=7>>

- [24] *Co se měří na optických kabelech* [online]. [cit. 2010-05-16]. Dostupné z <WWW: <http://www.mikrokom.eu/sk/pdf/co-se-meri.pdf>>.
- [25] HÁJEK, M., HOLOMEČEK, P. *Nová metoda měření PMD optických kabelových tras* [online]. [cit. 2010-05-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.mikrokom.eu/sk/pdf/pmd-mereni-tras.pdf>>.
- [26] HÁJEK, M., HOLOMEČEK, P. *POTDR – Lokalizace úseků se zvýšenou hodnotou PMD v optických* [online]. 2004 [cit. 2010-05-17]. Dostupné z <WWW: <http://www.mikrokom.eu/skoleni/pdf/potdr.pdf>>.
- [27] ČEPA, L., LUCKI, M., HÁJEK, J. *Porovnání metod kompenzace chromatické disperze u klasického optického jednovláknového vlákna* [online]. 2010 [cit. 2010-04-29]. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=porovnani-metod-kompenzace-chromaticke-disperze-u-klasickeho-optickeho-jednovlakového-vlakna&cislocclanku=2010020001>>
- [28] CHABA, Y., KALER, R.S. *Comparison of various dispersion compensation techniques at high bit rates using CSRZ format* [online]. 2009 [cit. 2010-04-29]. Dostupné z: WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
- [29] WEI, H., PLANT, D.V. *Simultaneous nonlinearity suppression and wide-band dispersion compensation using optical phase conjugation* [online]. 2004 [cit. 2010-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.opticsinfobase.org/>>.
- [30] CHUNG, H.S., CHUNG, Y.C. *Directly modulated CWDM/DWDM system using negative dispersion fiber for metro network application* [online]. 2004 [cit. 2010-05-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
- [31] JIANG, X., WANG, R. *Reverse dispersion fiber with depressed core-index profile for dispersion-managed fiber pairs* [online]. 2005 [cit. 2010-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
- [32] BUCHALI, F., BÜLOW, H. *Adaptive PMD Compensation by Electrical and Optical Techniques* [online]. 2004 [cit. 2010-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.opticsinfobase.org/>>.
- [33] KYSELÁK, M. *Moderní způsoby řešení PMD u stávajících optických tras* [online]. 2006 [cit. 2010-05-15]. Dostupný z WWW:

<<http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=moderni-zpusoby-reseni-pmd-u-stavajicich-optickych-tras&cislocclanku=2006042001>>

- [34] *Diagram oka* [online]. [cit. 2010-05-21]. Dostupné z WWW: <http://www.horevaj.com/horevaj/K4_files/K4_95.pdf>.
- [35] *Internetové stránky Safibra, s.r.o.* [online]. Říčany. Safibra s.r.o., 2010 [cit. 2009-05-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.safibra.cz/cesky/index.html>>
- [36] *Internetové stránky Lightwavestore.com* [online]. Ottawa. Lightwavestore.com, 2010 [cit. 2010-05-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.lightwavestore.com/store/product.php?productid=18990&cat=0&page=1>>

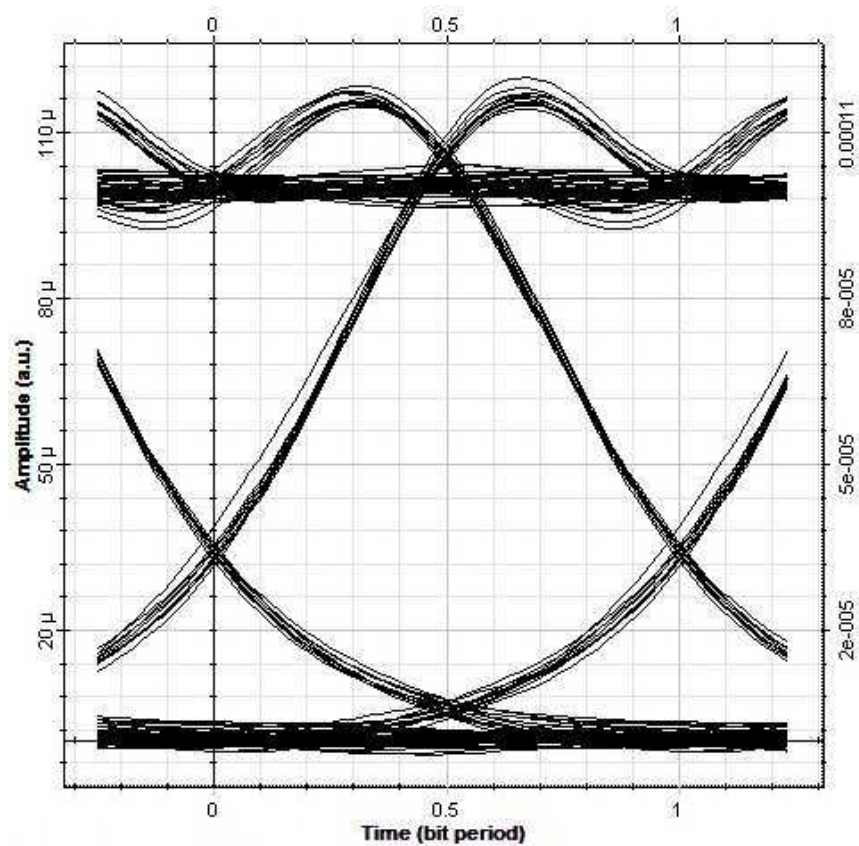
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

BER	Bit Error Rate (Bitová chybovost)
CD	Chromatic Dispersion (Chromatická disperze)
CW	Continuous Wave (Nepřetržitá vlna)
CWDM	Coarse Wavelegth Division Multiplexing (Hrubý vlnový multiplex)
DCF	Dispersion Compensating Fiber (Disperzi kompenzující vlákno)
DFB	Distributed Feedback Laser (Laser s rozprostřenou zpětnou vazbou)
DFF	Dispersion-flattened fiber (Vlákno s rovnou disperzí)
DGD	Differential Group Delay (Skupinové zpoždění)
DOF	Degree Of Freedom (Stupeň volnosti)
DOP	Degree Of Polarization (Stupeň polarizace)
DSF	Dispersion Shifted Fiber (Vlákno s posunutou disperzí)
DWDM	Dense wavelength division multiplexing (Hustý vlnový multiplex)
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier (Erbiem dopovaný vláknový zesilovač)
FBG	Fiber Bragg Grating (Čerpovaná Braggova mřížka)
FWM	Four Wave Mixing (Čtyřvlnné směšování)
GINTY	General Interferometry Analysis (Obecná interferometrická metoda)
GI-POF	Graded-Index POF (Plastové vlákno s gradientním indexem lomu)
IPA	Izopropylalkohol
ITU	International Telecommunication Union (Mezinárodní telekomunikační unie)
LED	Light Emitting Diode (Světlo vyzařující dioda)
MOST	Media Oriented Systems Transport (Multimediální optická sběrnice)
NDF	Negative Dispersion Fiber (Záporné disperzní vlákno)
NZ-DSF	Non Zero – Dispersion Shifted Fiber (Vlákno s posunutou nenulovou chromatickou disperzí)
OCWR	Optical Continuous Wave Reflctometer (Kontinuální optický reflektometr)
OPC	Optical Phase Conjugator (Optická fázová konjugace)
OTDR	Optical Continuous Wave Reflectometer (Optický reflektometr)
PD	Avalanche Photo Diode (Lavinová fotodioda)

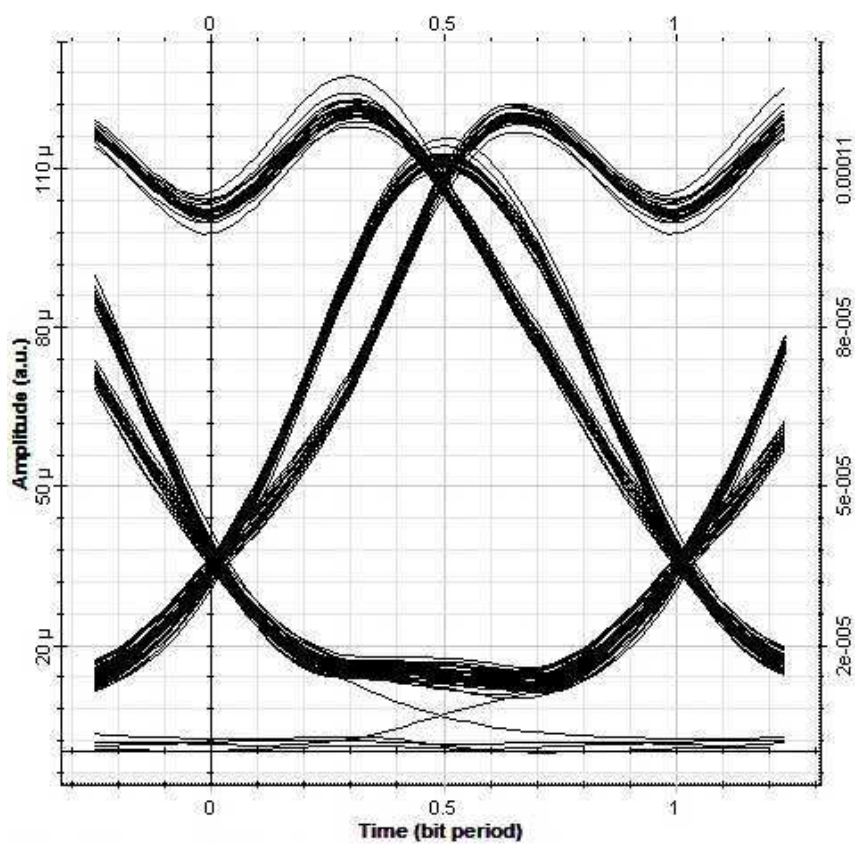
PIN	Fotodioda
PLC	Planar Lightwave Circuit (Planární obvod)
PMD	Polarization Mode Dispersion (Polarizační vidová disperze)
PMF	Polarization Maintaining Fiber (Vlákno udržující polarizaci)
POF	Plastic Optic Fiber (Plastové vlákno)
POFTO	Plastic Optic Fiber Trade Organization
POTDR	Polarization Optical Time Domain Reflectometry (Polarizační reflektometr)
RDF	Reverse Dispersion Fiber (Reverzní disperzní vlákno)
SBS	Stimulated Brillouin Scattering (Brilluinův rozptyl)
SMF	Single-Mode Fiber (Jednovidové optické vlákno)
SOP	State Of Polarization (Stav polarizace)
SPM	Self-Phase modulation (Vlastní fázová modulace)
SRS	Stimulated Raman Scattering (Ramanův rozptyl)
STP	Shielded Twisted Pair (Stíněná kroucená dvojlinka)
TINTY	Traditional Interferometry Analysis (Tradiční interferometrická metoda)
ULAF	Ultra Large Effective Core-Area (Ultra velká efektivní plocha jádra)
UTP	Unshielded Twisted Pair (Nestíněná kroucená dvojlinka)
WDM	Wavelength Division Multiplex (Vlnový multiplex)
XPM	Cross-phase modulation (Křížová fázová modulace)

PŘÍLOHY

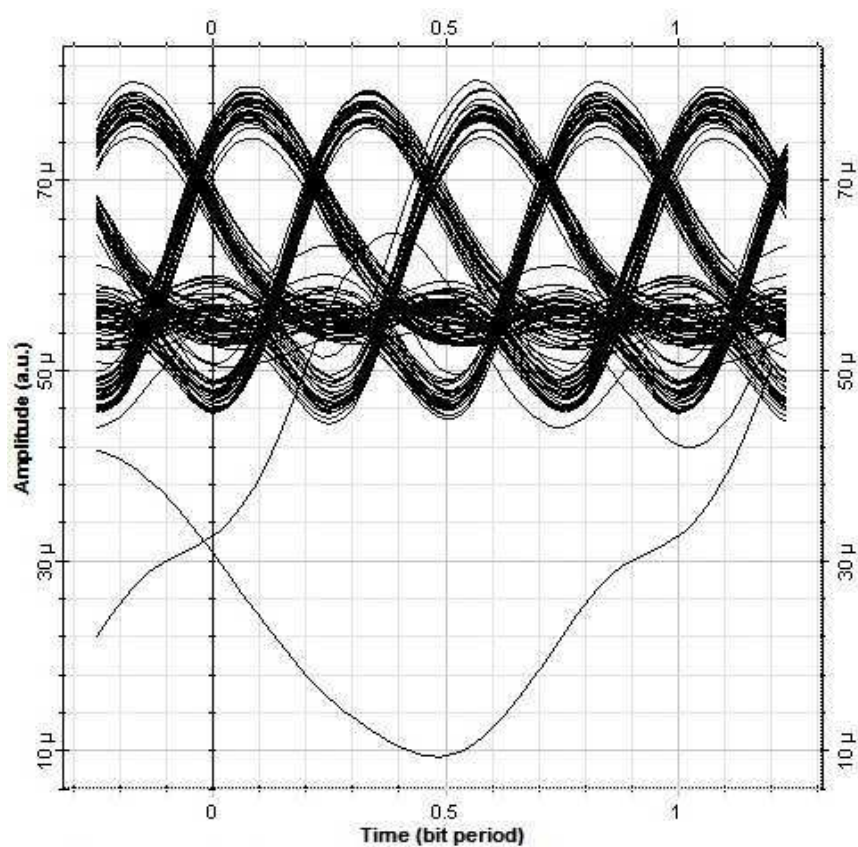
Příloha č. 1: Diagram oka při rychlosti 2,5Gb/s.....	72
Příloha č. 2: Diagram oka při rychlosti 10Gb/s.....	72
Příloha č. 3: Diagram oka při rychlosti 40Gb/s.....	73
Příloha č. 4: Diagram oka při rychlosti 40Gb/s po kompenzaci pomocí DCF (50km).....	73
Příloha č. 5: Diagram oka při rychlosti 40Gb/s po kompenzaci pomocí FBG (50km)	74
Příloha č. 6: Diagram oka při rychlosti 40Gb/s po kompenzaci pomocí DCF (62km).....	74
Příloha č. 7: Diagram oka při rychlosti 40Gb/s po kompenzaci pomocí FBG (57km)	75



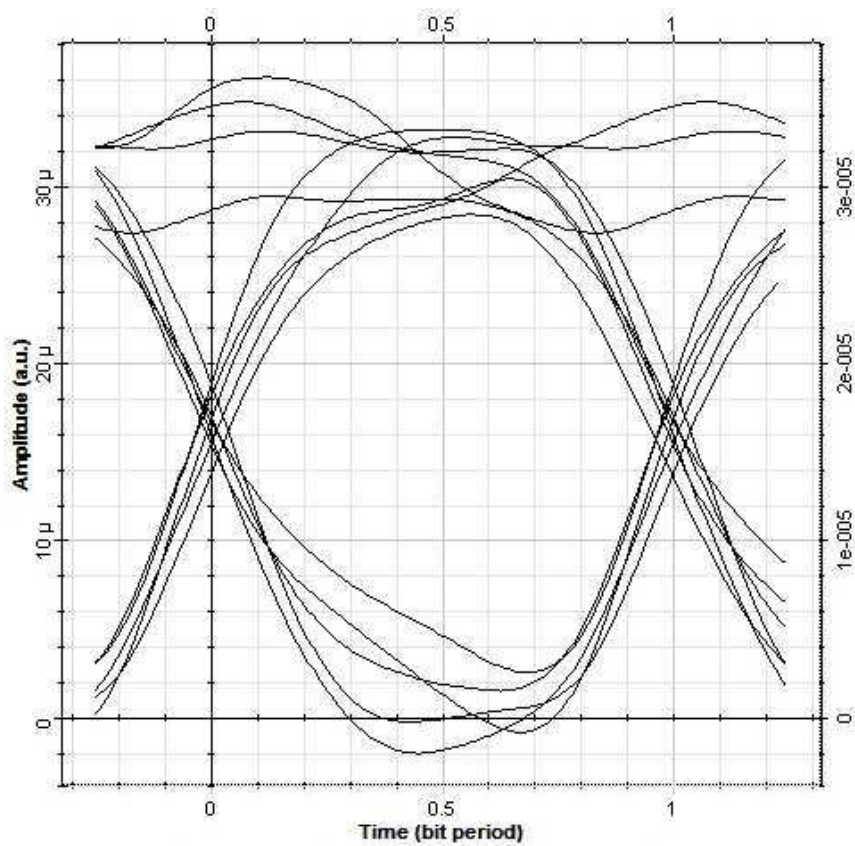
Příloha č. 1: Diagram oka při rychlosti 2,5Gb/s



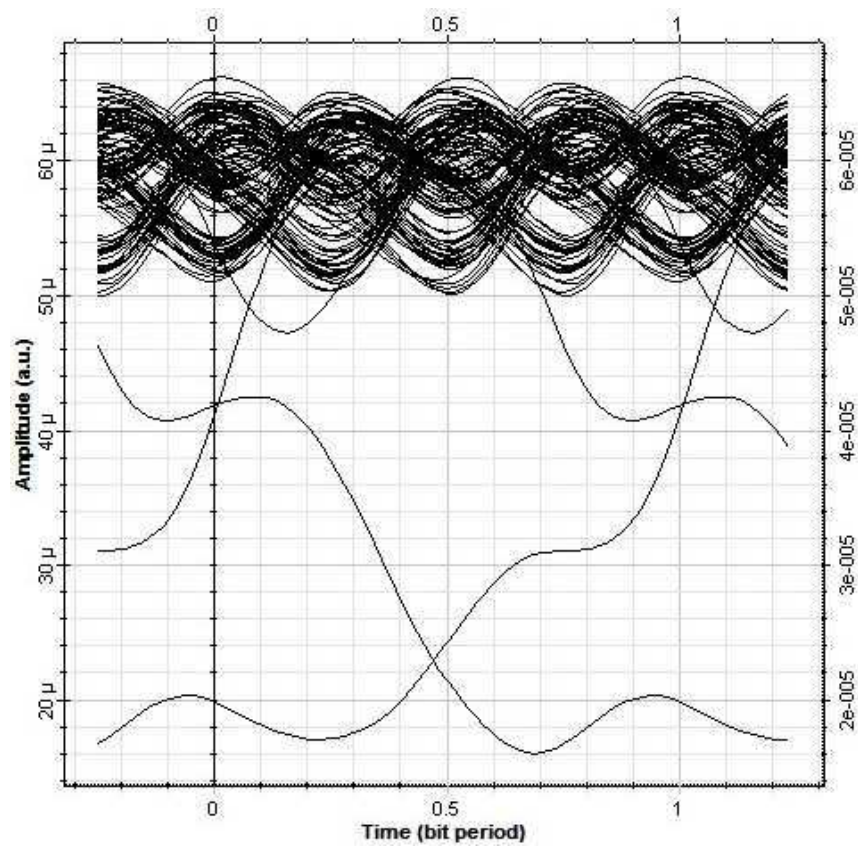
Příloha č. 2: Diagram oka při rychlosti 10Gb/s



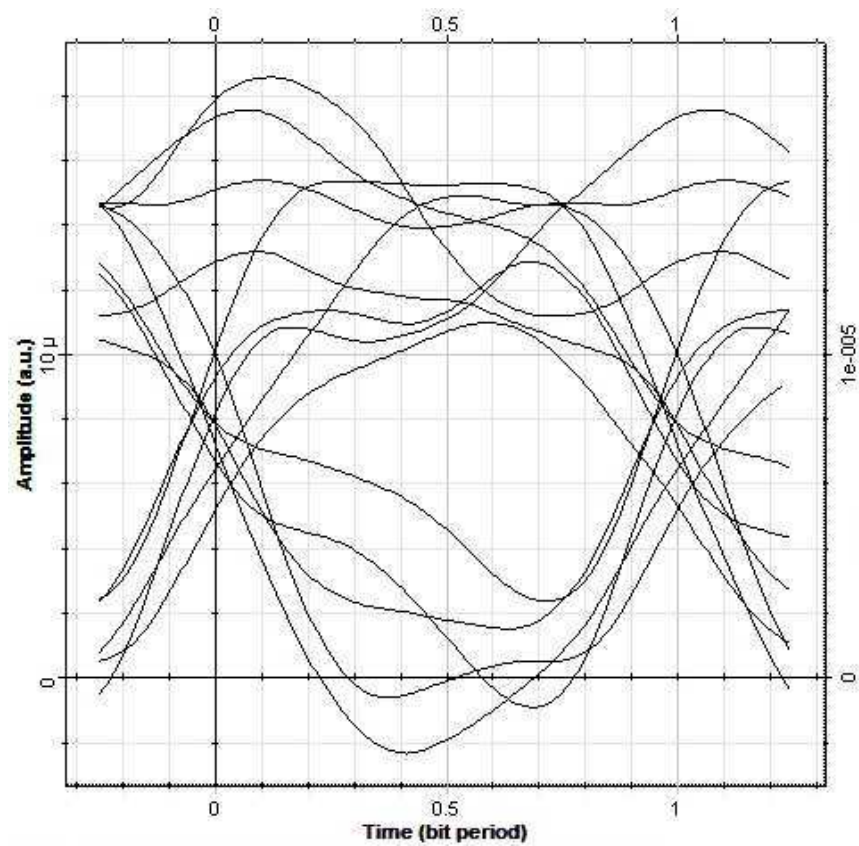
Příloha č. 3: Diagram oka při rychlosti 40Gb/s



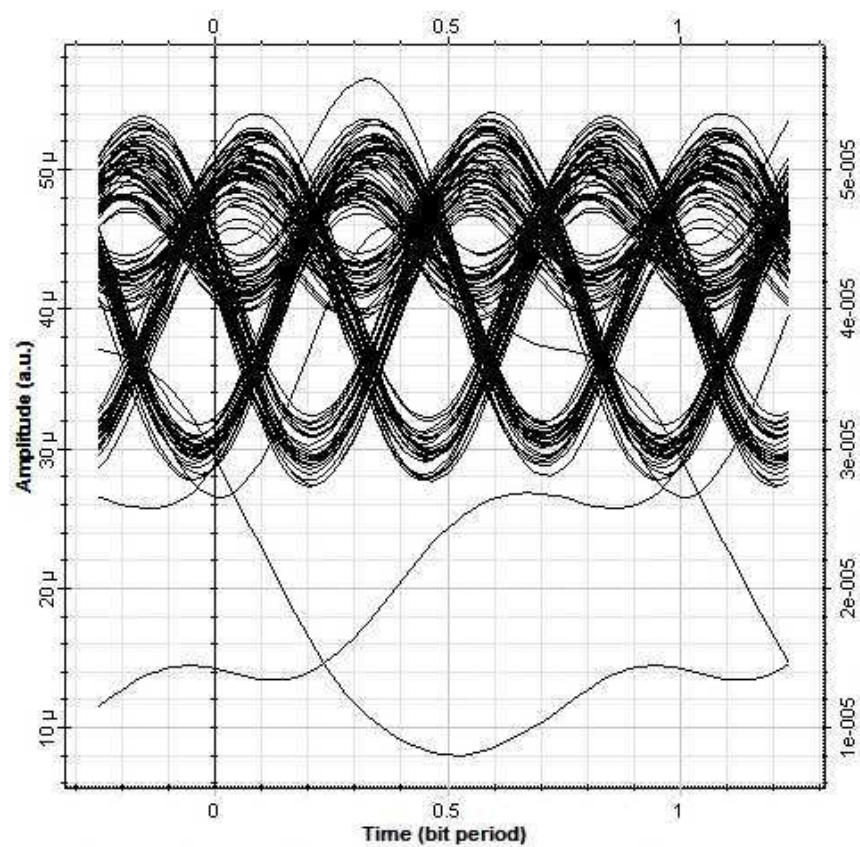
Příloha č. 4: Diagram oka při rychlosti 40Gb/s po kompenzaci pomocí DCF (50km)



Příloha č. 5: Diagram oka při rychlosti 40Gb/s po kompenzaci pomocí FBG (50km)



Příloha č. 6: Diagram oka při rychlosti 40Gb/s po kompenzaci pomocí DCF (62km)



Příloha č. 7: Diagram oka při rychlosti 40Gb/s po kompenzaci pomocí FBG (57km)